М.Б. Генералов

ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Допущено Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов
« Химическая технология энергонасыщенных материалов и изделий»

МОСКВА
ИКЦ «АКАДЕМКНИГА»
2004

УДК 66.0:662
ББК 35.11
Г 34

Рецензенты: академик РА РАН, д-р хим. наук, проф. Л.В. Забелин;
чл.-корр. РАН Б.В. Гидаспов

Генералов М.Б.

Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ: Учеб. пособие для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 397 с.: ил.

ISBN 5-94628-130-5

Рассмотрены свойства и структура промышленных взрывчатых материалов, факторы, определяющие технологическое оформление используемых процессов, требования к конструкциям и эксплуатации аппаратов. Особое место уделено вопросам использования взрывчатых материалов утилизированных боеприпасов для получения промышленных взрывчатых веществ, безопасности технологического оборудования и средствам пожаро- и взрывозащиты, а также экологическим проблемам.

Для студентов вузов, специализирующихся по направлению «Химическая технология энергонасыщенных материалов и изделий».

ISBN 5-94628-130-5

© М.Б. Генералов, 2004
© ИКЦ «Академкнига», 2004

ВВЕДЕНИЕ

Взрывчатые вещества (ВВ) являются концентрированными источниками энергии (энергонасыщенными веществами) и поэтому широко применяются в различных отраслях техники. В настоящее время ВВ широко используются: в горной технике; при строительстве; на гидромелиоративных работах; в сельском хозяйстве; в машиностроении при обработке металлов давлением, резке, штамповке, сварке; для защиты ландшафтов местности от пожаров, оползней, снежных лавин и града и т.п.

Взрывчатые вещества, используемые в мирных целях, получили название *промышленных*. Взрывчатые вещества с учетом применения принято представлять четырьмя группами: инициирующие (или первичные); бризантные (или вторичные); метательные, или пороха; пиротехнические составы.

Промышленные ВВ (ПВВ) относятся к бризантным, предназначенным для взрывных работ.

В настоящее время известно большое число ПВВ, однако практическое значение имеют лишь немногие из них только твердые и жидкие композиции. Их потребление из года в год возрастает: в 1992 г. в России было произведено 1,3 млн т ПВВ, их ассортимент постоянно меняется, исходя из технико-экономической эффективности и перспектив применения. Так, максимальное потребление индивидуальных бризантных ВВ в промышленности было отмечено в 1950–1952 гг. Затем им на смену пришли более дешевые и менее опасные при производстве и применении взрывчатые смеси из нитрата аммония с дизельным топливом (смесь АС–ДТ) и водосодержащие составы.

Смеси АС–ДТ и водосодержащие составы обладают рядом неоспоримых преимуществ перед другими ПВВ по наиболее важным показателям: экономичности, безопасности и эффективности применения, а также технологической простоте изготовления и скорости заряжания скважин. Упомянутые ПВВ нашли широкое применение во многих странах мира, объем их выпуска значительно превосходит объемы других типов взрывчатых смесей.

В последние годы интенсивно развивается производство ПВВ непосредственно на местах их применения с использованием модульных стационарных и передвижных мини-заводов в сочетании с использованием специализированных смесительно-зарядных машин.

В качестве ПВВ стали применяться взрывчатые элементы, извлеченные из утилизируемых боеприпасов. Это позволит в определенной степени сократить дефицит в водостойких ПВВ (на несколько процентов от их годовой потребности), а также уменьшить запасы устаревших боеприпасов, опасных для дальнейшего хранения и экологически вредных для уничтожения. Это – главная цель утилизации устаревших боеприпасов, поскольку скопились десятки тысяч вагонов боеприпасов, технически непригодных или запрещенных к боевому применению.

Степень вредного воздействия самих ПВВ, их компонентов и продуктов взрывного превращения на окружающую природную среду, через которую опосредованно возможно влияние на человека и другие живые организмы, определяется целым рядом факторов на стадиях производства, хранения и применения взрывчатых веществ. К ним можно отнести химический состав, способ получения ВВ, его физическое состояние, химическую и физическую стойкость, условия взрывания.

Одной из основных особенностей производства любого ВВ, и промышленного в частности, по сравнению с предприятиями других отраслей, является угроза воспламенения или взрыва, при реальной возможности которого происходит работа. Поэтому технике безопасности в производстве ВВ уделяется особое внимание. Только тот технологический процесс применим, который наименее опасен и менее сложен в практической реализации. Необходимо знать, что ВВ опасны лишь при известных условиях, задача специалиста состоит в том, чтобы исключить возможность возникновения этих условий, предусмотреть все возможные отклонения от штатного режима проведения технологического процесса. При разработке технологического процесса, используемого оборудования должны быть выделены все опасные операции и приняты необходимые профилактические меры, связанные как с действиями обслуживающего персонала, так и со средствами пожаро- и взрывобезопасности.

Полная автоматизация, включающая автоматический контроль и автоматическое управление, является желательной формой оформления технологических процессов и используемого оборудования в производстве ПВВ. Это во многом исключает необходимость участия людей в опасных фазах производства, обеспечивает большую надежность и безопасность работы.

В данной книге изложены доступные научные и технические достижения в области процессов и аппаратов технологии ПВВ. Несмотря

на то что в ней освещен большой круг вопросов в области ПВВ, изложенный материал не является исчерпывающим. Для полного понимания всех вопросов теории и практики ПВВ необходимо ознакомиться еще с другими книгами и информационными источниками, часть из которых указана в соответствующих разделах книги.

Применяемые в настоящее время ПВВ далеко не в полной мере удовлетворяют всем предъявленным к ним требованиям, поэтому изыскание новых и более эффективных ВВ является важной задачей специалистов, работающих в этой области. Остается актуальной проблема дальнейшего совершенствования технологии производства ВВ, используемых процессов и аппаратов. Все еще остаются не до конца решенными некоторые вопросы снижения опасности производства на всех его стадиях, повышения производительности и снижения себестоимости продукта.

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

1.1. Краткий исторический обзор создания промышленных взрывчатых веществ [1–8, 10]

Область применения ВВ. Взрывчатыми веществами называются химические соединения или их смеси, склонные под влиянием внешнего воздействия к очень быстрому химическому превращению с выделением большого количества энергии и большого объема газов с высокой температурой. Сжатые газообразные продукты, мгновенно расширяясь, способны производить механическую работу по перемещению или разрушению окружающей среды и образовывать в окружающей среде ударные волны.

Химическое превращение (химическая реакция), сопровождающееся или способное сопровождаться взрывом, называют *взрывным превращением.* В отличие от горения обычных горючих веществ реакции взрывного превращения ВВ протекают без участия кислорода воздуха. Сравнение теплоты одних и тех же реакций, отнесенных к единице объема, показывает, что у жидких и твердых ВВ концентрация энергии в единице объема в 200–300 раз больше, чем у обычных горючих, и в 1000 раз больше, чем у смеси водорода и кислорода [1].

Взрывчатые вещества являются концентрированными источниками энергии, их широко применяют в военном деле и различных отраслях техники. В настоящее время ВВ широко используют в горной промышленности, при строительстве, на гидромелиоративных работах, в сельском хозяйстве, при борьбе с пожарами; они находят применение при резке, штамповке, сварке, упрочнении металлов взрывом и в других областях техники.

Отечественная промышленность производства и переработки ВВ представляет собой высокоразвитую область техники, играющую важную роль в общей системе экономики страны и ее обороне.

Известно очень большое количество химических веществ и смесей, склонных к взрывному превращению. Однако далеко не все они могут быть использованы в качестве ПВВ, т.е. ВВ, которые можно использовать для взрывных работ в промышленности и сельском хозяйстве.

Для практического использования в качестве ПВВ пригодны достаточно безопасные в обращении и производстве ВВ, эффективность которых оправдывает затраты на их изготовление и применение.

Промышленность ВВ возникла во второй половине XIX в. Значительное развитие она получила лишь в XX в. на базе бурного развития науки и техники основной химии, достижений в коксохимической и нефтеперерабатывающей отраслях промышленности как источников сырья для бризантных ВВ.

До 1860 г. единственным взрывчатым веществом был дымный или черный порох, который использовался в военном деле, а позднее и в качестве промышленного ВВ. Происхождение дымного пороха точно не известно; предположительно впервые порох появился в Китае не позднее XII в.

Изобретение динамита и бризантных взрывчатых веществ. С открытием в 1845 г. нитроглицерина (Собреро, Италия) и изобретением динамита (А. Нобель, Швеция) закончился первый многовековой период истории ВВ [2].

Открытие динамита А. Нобелем произошло случайно. В 1861 г. Нобель открыл в Швеции первый завод по производству нитроглицерина [3]. При перевозке «взрывчатое масло», как раньше называли нитроглицерин, пролилось в кизельгур (инфузорную землю), который использовали при упаковке [2]. Обнаружив, что кизельгур поглощает нитроглицерина в 3 раза больше своей массы, А. Нобель стал поставлять на рынок первый из динамитов – смесь, состоящую из 75% нитроглицерина и 25% кизельгура. Впоследствии А. Нобель заменил кизельгур более активными абсорбентами (смесь нитрата натрия с целлюлозным материалом).

В начале второго периода (конец XIX – начало XX в.) за короткое время были созданы или открыты ВВ нового типа. В 1863 г. впервые получен тротил, в 1883 г. открыт тетрил. В 1897 г. впервые было получено мощное ВВ – гексоген, а в 1941 г. – октоген и др.

Первые аммиачно-селитренные ВВ. В 1867 г. шведские исследователи И. Ольсен и И. Норбин установили, что аммиачную селитру можно сенсибилизировать разнообразными горючими добавками, и предложили готовить ВВ на основе смесей аммиачной селитры с углем, углеродо- и азотосодержащими органическими веществами. Кроме того, ими было обнаружено, что нитрат натрия в составе динамита можно заменить аммиачной селитрой.

В последующие годы аммиачно-селитренные взрывчатые вещества (АСВВ) находили все большее применение за счет максимального использования сбалансированных смесей аммиачной селитры с горючими добавками в динамитах и создание безнитроглицериновых рецептур.

В Советском Союзе уже в годы первой пятилетки (30-е годы XX в.) наряду с нитроглицериновыми ВВ (динамитом, сольвенитом, гризутинами) появились АСВВ, содержащие в своем составе аммиачную селитру и тротил; эти составы получили название *аммониты* [4]. Быстрое все расширяющееся применение АСВВ обусловливалось не только экономической выгодой, но и преимуществом АСВВ с точки зрения безопасности в обращении и токсичности.

После Великой Отечественной войны промышленностью нашей страны начали выпускаться более эффективные по сравнению с довоенным временем аммониты, в том числе скальные, содержащие гексоген. В этот период появились новые специальные ПВВ для угольных шахт.

В общем производстве ПВВ соотношение между нитроглицериновыми и АСВВ во всем мире неуклонно менялось в пользу последних. Так, в США общее количество производимых ПВВ к 1970 г. достигло 1020 тыс. т, в том числе выпуск динамитов составлял менее 100 тыс. т [2]. В нашей стране доля нитроглицериновых взрывчатых веществ в общем балансе ПВВ также незначительна.

Начиная с 60-х годов XX столетия ассортимент отечественных ПВВ пополнился гранулированными ВВ, такими, как *игданит, гранулиты, зерногранулиты.* С появлением новых ПВВ стало возможным в значительной мере механизировать, а в ряде случаев и автоматизировать, процессы заряжения скважин и интенсифицировать взрывные работы. Благодаря меньшей чувствительности АСВВ к механическим воздействиям оказалось возможным организовать механизированное, крупнотоннажное производство взрывных смесей на местах ведения взрывных работ.

Простейшие промышленные взрывчатые вещества. С 1955–1957 гг. в США, Канаде и СССР начали применять взрывчатые смеси, состоящие из аммиачной селитры (АС), сенсибилизированной горючими невзрывчатыми добавками (ДТ – дизельным топливом, алюминиевым порошком, углем и др.). Эти взрывчатые смеси получили название простейшие промышленные ВВ.

В наиболее простой взрывчатой смеси (АС–ДТ) аммиачная селитра составляет 94%, дизельное топливо 6%. Пористая гранулированная аммиачная селитра легко впитывает и удерживает надлежащее количество жидкого топлива. Изготовление и заряжание смеси АС–ДТ в скважины на местах применения механизировано и отличается высокой производительностью. Смесь АС–ДТ сначала использовали только в скважинах большого диаметра при открытых взрывных работах, но позднее ее стали применять при взрывных работах в подземных условиях в скважинах небольшого диаметра. Это стало возможным благодаря заряжанию ее в шпуры с помощью пневмозарядчиков под дав-

лением, достаточным для того, чтобы раздробить гранулы и таким образом снизить критический диаметр детонации до размера, меньшего, чем диаметр шпура. (Смесь АС–ДТ до заряжания таким способом имела критический диаметр детонации – 102–127 мм.)

По сравнению с ранее применявшимися ВВ простейшие взрывчатые смеси имели следующие неоспоримые преимущества:

- недефицитность и низкая стоимость сырья;
- смесь АС–ДТ намного безопаснее в обращении, чем динамиты и другие порошкообразные ВВ. Благодаря малой чувствительности к механическим воздействиям оказалось возможным организовать их крупнотоннажное механизированное производство на местах ведения взрывных работ, а также осуществлять их механизированное заряжание;
- смеси АС–ДТ, в отличие от патронированных ВВ, полностью заполняют объем скважины, что имеет большое значение для повышения эффективности действия взрыва.

Только два недостатка не позволяют смеси АС–ДТ полностью заполнить рынок промышленных ВВ:

- она легко теряет детонационную способность под воздействием воды и поэтому не может применяться в обводненных условиях, которые характерны для значительной части взрывных работ;
- несмотря на полное заполнение объема скважины, эта смесь, имея низкую плотность 800 кг/м^3, развивает также и низкое давление в скважине, недостаточное для эффективного разрушения крепких пород, например горных.

В некоторых случаях недостаточная водоустойчивость этой смеси в настоящее время частично компенсируется использованием сложных методов осушения скважин.

Промышленные водосодержащие взрывчатые вещества (ВВВ). Отмеченные недостатки смесей АС–ДТ обусловили необходимость проведения исследований, направленных на создание водоустойчивых взрывчатых смесей. В результате были созданы гелеобразные и эмульсионные водосодержащие взрывчатые смеси.

Гелеобразное ВВ представляет собой загущенный и структурированный с помощью гидрофильного коллоида, например карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) или полиакриламида, раствор окислителя, в котором равномерно распределено горючее. Они содержат суспензии водного раствора аммиачной и других селитр, сенсибилизированные гранулированным тротилом, алюмотолом, порохом, горючими добавками.

Позднее стали применять смеси, сенсибилизированные порошками алюминия. В ряде случаев находят применение водонаполненные взрывчатые составы, не содержащие ни тротила, ни алюминия, а сенсибилизированные только горючими добавками (например, нефте-

продуктами). Эти взрывчатые смеси имеют самые низкие значения плотности и работоспособности, но и самую низкую стоимость.

В 1969 г. в США были предложены промышленные ВВ нового класса – *эмульсионные ВВ* (ЭВВ), или *эмулиты* [5]. Принцип построения рецептур таких ВВ основан на получении «обратных» эмульсий из высококонцентрированного раствора окислителей (аммиачная, натриевая, кальциевая селитры) в масле (нефтепродукте) в присутствии поверхностно-активных веществ (эмульгаторов) [6]. В зависимости от содержания жидкой фазы эмульгаторы могут обладать как текучими, так и пластическими свойствами. Для повышения энергетических показателей во многие сорта эмульсионных ВВ вводят мелкодисперсный алюминиевый порошок. Для повышения детонационной способности эмульсионных ВВ их насыщают газовыми пузырьками с помощью микросфер, порофор или иным способом [7].

Свойства ЭВВ позволяют создать гамму ВВ различных составов, отвечающих практически любым техническим требованиям потребителя. Опыт применения ЭВВ показал следующие существенные их преимущества по сравнению с другими промышленными ВВ:

- отличная водоустойчивость, срок пребывания заряда в скважине 10–30 суток даже в проточной воде, что позволяет вести заряжание скважин вслед за их бурением;
- возможность регулирования мощности ЭВВ в широких пределах 3570–5880 кДж/м^3 за счет изменения плотности ВВ или введения в его состав энергетических добавок;
- крайне низкая чувствительность к механическим и тепловым воздействиям и, следовательно, высокая безопасность в обращении;
- экологически чистое безотходное производство, полная механизация заряжания скважин и низкая газовая вредность (25–40 л/кг);
- доступная и сравнительно дешевая сырьевая база.

Таким образом, кроме водоустойчивости, эмульсионные ВВ имеют еще одно очень существенное преимущество – они являются в настоящее время самыми безопасными из всех ПВВ.

Очевидные достоинства ЭВВ этого типа привлекли внимание широкого круга исследователей, что выразилось прежде всего в большом количестве патентов, выданных на ЭВВ в различных странах мира. Так, за период 1964–1983 гг. на ЭВВ в различных странах мира было выдано свыше 70 патентов. Кроме того, эти ВВ очень быстро нашли применение при производстве взрывных работ в промышленности и с каждым годом объем их применения увеличивается.

В 1972 г. ЭВВ начинают производить в США, в 1978 г. – в Швеции, а несколько позже во многих странах мира. В нашей стране первое

эмульсионное ВВ этого типа – «порэмит» было разработано в 1985 г.; с 1988 г. началось его промышленное производство [5].

О перспективности разработки и применения эмульсионных ВВ можно судить по доле, приходящейся на ЭВВ, в общегодовом объеме применения промышленных ВВ в странах Европы, которая составила в 1993 г. 19,8%, а в 1996 г. уже 29,8%.

Создание пластичных ВВ. В 1970-х годах в нашей стране началось производство пластичных и эластичных ВВ; по составу они представляют собой высоконаполненные гетерогенные системы, связующим в которых является пластифицированный полимер, в качестве наполнителя используется гексоген, а в ряде случаев мелкокристаллический ТЭН. Заряды из пластичных ВВ в виде шнуров, лент и листов используются для резки, штамповки, упрочнения и сварки металлов взрывом, для борьбы с лесными пожарами, ремонта крупных трубопроводов и др. [8, 11].

В заключение необходимо отметить, что потребление ПВВ для мирных целей из года в год возрастает. В 1977 г. общий расход ПВВ в мире достиг нескольких миллионов тонн [2]. Поэтому современная технология их производства должна базироваться на использовании высокопроизводительного, надежного и безопасного оборудования.

Одной из особенностей промышленных предприятий, производящих ВВ, является возможность вспышки или взрыва. Поэтому вопросам безопасной работы оборудования в производстве промышленных ВВ уделяется особое внимание. При проектировании машин и аппаратов должны быть приняты профилактические меры по безопасности технологического процесса. Широкая механизация и автоматизация при работе основного технологического оборудования, отсутствие людей на опасных фазах производства обеспечивают большую надежность и безопасность работы.

Исключительно важное значение для оборудования большой единичной производительности имеет максимальная экономия материальных и энергетических ресурсов.

Создание нового оборудования, интенсифицирующего процесс производства промышленных ВВ и изделий из них, должно базироваться на современных достижениях науки и техники в области процессов и аппаратов химической технологии, машин и агрегатов химических и нефтехимических производств, а также в смежных областях знаний.

1.2. Классификация промышленных взрывчатых веществ по составу компонентов [1, 2, 4–11]

Твердые ПВВ. Известно большое количество химических веществ и смесей, склонных к взрывному превращению. Однако для практиче-

ского использования в качестве промышленных взрывчатых веществ пригодны лишь немногие из них: безопасные в обращении и производстве, эффективность которых оправдывает затраты на их изготовление и применение.

По физическому состоянию ПВВ могут быть твердыми, пластичными (эластичными) и жидкими.

В настоящее время для взрывных работ главным образом используют ВВ в твердом (монолитном и сыпучем) и пластическом состояниях.

Монолитные твердые ВВ (примером могут служить заряды из литого или прессованного тротила) применяются на взрывных работах в сравнительно небольшом количестве. В большинстве случаев твердые ПВВ используются в виде порошков или гранул. Для удобства применения порошкообразные ВВ часто патронируют в бумажные гильзы, полимерные оболочки или в шланговые заряды, находящиеся в твердой оболочке.

Сыпучими твердыми ВВ являются индивидуальные бризантные ВВ (тротил, гексоген и др.) и механические смеси компонентов, вступающие между собой в реакцию при взрыве (смесевые ВВ).

К смесевым ВВ принадлежат наиболее типичные промышленные взрывчатые составы: *аммониты, детониты, динамоны, алюмотолы* и др. [1, 7]. Смесевые ПВВ обычно имеют в своем составе вещество, богатое кислородом (селитра аммиачная, натриевая или кальциевая; хлораты и перхлораты), а также компоненты, сгорающие в процессе взрыва частично или полностью за счет кислорода перечисленных веществ.

Сгорающими компонентами могут быть невзрывчатые вещества (парафин, дизельное топливо, древесная мука, уголь, алюминиевый порошок и др.) или ВВ, содержащие недостаточное количество кислорода для полного окисления углерода и водорода, входящих в их состав (тротил, гексоген и др.).

Как уже отмечалось, из числа смесевых ПВВ наибольшее применение находят *аммиачно-селитренные взрывчатые вещества*, в которых основным кислородосодержащим компонентом является аммиачная селитра (аммония нитрат) – NH_4NO_3.

К АСВВ относятся *аммониты, зерногранулиты, аммоналы, детониты, динамоны.*

Кроме участвующих в реакции взрывного превращения компонентов, в состав некоторых смесевых ПВВ для придания им особых свойств вводят инертные добавки. Так, для гашения пламени в состав ВВ вводят поваренную или иную соль; такие составы получили название – *предохранительные промышленные ВВ* [1].

Аммиачно-селитерные смеси, содержащие тротил, называют *аммонитами.* В состав аммонитов могут входить горючие невзрывчатые вещества.

Составы основных аммонитов и аммоналов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Составы, %, предохранительных и непредохранительных аммонитов и аммоналов [1]

Вещество	Непредохранительные ВВ			Предохранительные ВВ		
	Аммониты		Аммонал	Аммониты		
	6ЖВ	Скальный №1	Скальный №1	АП-5ЖВ	ПЖВ-20	Т-19
Аммиачная селитра	79	66	72	70	64	61
Тротил	21	5	4	18	16	19
Гексоген	–	24	15	–	–	–
Алюминий (порошок)	–	5	8	–	–	–
Хлорид натрия	–	–	–	12	20	20
Динитротолуол	–	–	1	–	–	–

Крупнодисперсные аммониты, изготовленные простым смешением тротила с гранулированной аммиачной селитрой, получили название *зерногранулитов* или *граммонитов*.

Аммониты, в состав которых наряду с другими компонентами входит алюминиевый порошок или пудра, называют *аммоналами*. Зерногранулиты (граммониты), содержащие алюминий (порошок или пудру), получили название *граммоналов*.

Состав некоторых зерногранулитов приведен в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Состав зерногранулитов [4, 7]

Вещество	Граммониты			Граммоналы	
	79/21	50/50-В	30/70	А-8	А-45
Аммиачная селитра	79	50	30	80	40
Тротил	21	50	70	12	45
Алюминиевая пудра	–	–	–	8	15

Промышленные ВВ, содержащие, кроме аммиачной селитры, только лишь горючие невзрывчатые вещества, называются *динамонами*. К их числу относят смеси гранулированной селитры с соляровым маслом (дизельным топливом) – *игданиты* и такие же смеси, покрытые алюминиевой пудрой – *гранулиты*.

Таблица 1.3

Состав, %, динамонов [7]

Вещество	Игданит	Гранулиты				
		М	АС-4	АС-8	АС-4В	АС-8В
Аммиачная селитра	94,5	94,5	91,8	89	91,8	88
Минеральное масло	5,5	5,5	4,2	3	4,2	4
Алюминиевая пудра	–	–	4	8	4	8

Составы основных динамонов приведены в табл. 1.3.

Особую группу представляют аммиачно-селитренные ВВ, в составе которых имеется небольшое количество (до 15%) жидких нитроэфиров. К таким ВВ относят *детониты* и *угленитъ*. Из-за опасности в производстве и применении ВВ, содержащих примеси жидких эфиров, их выделяют в группу *нитроглицериновых ВВ.*

Составы некоторых детонитов и угленитов приведены в табл. 1.4.

К сыпучим ПВВ также относятся гранулированный тротил – *гранулотол*, а также гранулы из сплава тротила с алюминиевым порошком – *алюмотол* [4].

Пластичные ПВВ. Обычно они бывают двух типов: состоят из смеси твердых компонентов с жидкой желатинированной массой или

Таблица 1.4

Состав, %, низкопроцентных нитроглицериновых ВВ [7]

Вещество	Детониты				Угленитъ		
	6А	10А	15А-10	М	Э-6	5	7
Аммиачная селитра ЖВ	77	76	74	78	–	14	–
Смесь нитроэфиров	6	10	14,7	10	14	10	10
Тротил	11	8	–	–	–	–	–
Алюминий (пудра)	5,3	5,2	10	10,7	–	–	–
Стеарат кальция	0,7	0,7	1	1	1	–	–
Коллодионный хлопок	–	0,1	0,3	0,3	0,2	–	–
Натрия нитрат	–	–	–	–	46,3	–	–
Калия нитрат	–	–	–	–	–	–	57
Древесная мука	–	–	–	–	2,5	1	2
Хлорид натрия	–	–	–	–	–	75	–
Хлорид калия	–	–	–	–	7	–	–
Хлорид аммония	–	–	–	–	29	–	30
Сода (сверх 100%)	0,25	0,2	0,2	0,2	–	–	–

представляют собой полимерную матрицу, заполненную твердым дисперсным наполнителем (композиционные пластичные ВВ).

Пластичные ВВ с жидкой желатинированной массой изначально содержали 75% нитроэфиров и получили название *динамитов* [2].

Композиционные пластичные ВВ по структуре представляют собой пластифицированный полимерный материал (матрицу) синтетического каучука, внутри которого равномерно распределены твердые частицы мощного бризантного взрывчатого вещества, например, гексогена, ТЭНа и др. В зависимости от типа полимерного материала их разделяют на *пластиты* и *эластиты* [8]. Они часто используются, например, при обработке металлов и других материалов давлением, резке различных конструкций и т.п. [10].

Водосодержащие промышленные ВВ. Водосодержащие взрывчатые смеси различают двух типов: гелеобразные и эмульсионные.

Гелеобразные ВВ характеризуются следующим. В настоящее время на взрывных работах стали применять взрывчатые вещества, содержащие в качестве жидкого наполнителя и пластифицирующего материала *водные гели*. Такие композиции получили название гелеобразных взрывчатых веществ [9].

Гелеобразующими веществами являются набухшие в воде синтетические или природные полимеры (например, соли карбоксиметилцеллюлозы, полиакриламид, полисахариды и др.). Водные гели являются не только наполнителем и пластификатором, но также предотвращают или замедляют вымывание селитры и других растворимых в воде солей из ВВ при заряжании обводненных скважин. Они также придают ВВ пластичность и другие полезные эксплуатационные качества.

Простейшие композиции водосодержащих ВВ, кроме водного геля, содержат аммиачную селитру, тротил или алюминий. Более сложные составы содержат одновременно тротил и алюминий, гранулированный сплав тротила с гексогеном или ТЭНом, нитраты щелочных и щелочноземельных металлов, антифризы и др. [2].

В ряде случаев гелеобразные ВВ из-за низких детонационных свойств сенсибилизируют газовыми пузырьками и применением высокодисперсной алюминиевой пудры. Для этого в состав водосодержащих ВВ вводят полые тонкостенные шарики из полимеров или стекла, заполненные воздухом *(микросферы)*. Иногда в состав ВВ вносят так называемые *порофоры* – вещества, способные взаимодействовать с каким-либо из компонентов взрывчатой смеси с образованием газообразных продуктов реакции, так называемые *газогенерирующие добавки* (ГГД).

В зависимости от химического состава гелеобразные ВВ изменяют свои реологические свойства от текучего состояния, например, как вязкие жидкости, до густых консистенций, напоминающих каучуки. В качестве иллюстрации на рис. 1.1 представлена фотография водосодержащей взрывчатой смеси известной фирмы «IRECO» (США) [2].

Рис. 1.1. Патронированная алюминизированная водосодержащая смесь (сларри) фирмы «IRECO» (США)

В нашей стране наибольшее применение получили следующие рецептуры гелеобразных водосодержащих ВВ: акватолы, карботолы, акваналы, акваниты.

Акватолы в качестве твердой фазы содержат смесь гранулированной аммиачной селитры с гранулотолом или алюмотолом. В качестве жидкой фазы используется насыщенный раствор селитры, загущенный солью карбоксиметилцеллюлозы. Наиболее распространен акватол Т-20, содержащий 20% гранулотола или алюмотола; количество воды в жидкой фазе составляет 20%, имеется несколько его модификаций.

Карботолы – это литьевые составы водосодержащих ВВ, отвердевающие после загрузки в скважину. Их изготовляют из низкоплавкой эвтектики аммиачной селитры и карбамида, сенсибилизированной тротилом; в состав вводится 3–5% воды для образования раствора. Иногда они содержат в качестве структурообразователя соли карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) с бихроматом, используемым для сшивки структуры. Так, в карбатоле ГЛ-15Т сенсибилизатором служит гранулотол. Карботол ГЛ-10В наряду с гранулотолом содержит алюминиевый порошок; карботол ФТ-10 в качестве высококалорийного и недорогого металла содержит ферросилиций.

Акваналы представляют собой смесь металлизированной твердой фазы (порошок алюминия или силикоалюминия) с насыщенным водным раствором аммиачной селитры.

Акваниты – это смесь аммиачной селитры с тротилом, гексогеном или алюминиевым порошком, пластифицированная загущенным водным раствором нитратов кальция, натрия или аммония. В качестве загустителя часто используется КМЦ. Для стабилизации пластических свойств в состав аквонитов вводят поверхностно-активные вещества или добавки минеральных масел.

В зависимости от рецептурного состава акваниты в момент заряжения могут иметь пластичную консистенцию (акванит № 2), обладать литьевыми свойствами вязкой жидкости (акванит ЗЛ) или находиться в сыпучем гранулированном состоянии (акванит АРЗ-8Н). Например, акванит АРЗ-8Н (акванит раздельного заряжания) состоит из смеси аммиачной селитры (88%), алюминиевого порошка (4%) и растворимого в воде загустителя (8%). Предназначенный к применению в подземных условиях, он выпускается в виде гранул, которые смешиваются с водой и пластифицируются в процессе заряжания с образованием плотного заряда. Таким образом, в акваните АРЗ-8Н совмещаются достоинства и гранулированных, и водосодержащих ВВ.

Составы некоторых водосодержащих ВВ приведены в табл. 1.5.

Основные преимущества гелеобразных ВВ перед гранулированными и порошкообразными ВВ состоят в их высокой плотности (1300–1500 кг/м^3), водоустойчивости, способности целиком заполнять зарядные емкости без принудительного уплотнения, безопасности в обращении в связи с низкой чувствительностью к механическим и тепловым воздействиям. Вместе с тем более сложный рецептурный состав и технология изготовления, меньшая физическая стабильность

Таблица 1.5

Состав, %, водонаполненных ВВ [7]

Вещество	Акватолы				Акваниты	
	65/35с	М-15	65/35 АВ	МГ	ЗЛ	№ 2
Аммиачная селитра	63	58,5	51	26,5	25,5	44,2
Натрия нитрат	–	–	–	20	32	–
Кальция нитрат	–	–	–	–	–	7,4
Тротил	34	25	28	–	30	5,0
Алюмотол 25/75	–	–	–	40	–	–
Алюминий (порошок)	–	15	–	–	–	–
Гексоген	–	–	–	–	–	35,0
Загуститель	3	1,5	2	1,5	0,5	1,1
Масло вазелиновое	–	–	–	–	–	0,8
Антифриз	–	–	5	–	–	–
Вода	–	–	14	12	12	6,5

удорожают их по сравнению с твердыми сыпучими промышленными ВВ. По этим причинам гелеобразные ВВ в нашей стране и других странах применяют в значительно меньших объемах, чем сыпучие составы ПВВ. Так, в 1980 г. в Советском Союзе было изготовлено гелеобразных ВВ всего 9,4% общего годового выпуска ПВВ [5].

В зарубежных странах (США, Канаде и др.) гелеобразные взрывчатые суспензии получили название сларри (slurry). В 1970 г. в США было изготовлено порядка 120 тыс. т гелеобразных ВВ, что составило 11–12% общего выпуска ПВВ.

Эмульсионные ВВ, как и все водоэмульсионные ВВ, состоят в основном из высококонцентрированного раствора аммиачной селитры (иногда с добавками натриевой или кальциевой селитр) и жидкого нефтепродукта (дизельного топлива, индустриального масла, мазута и т.п.). Раствор окислителей, нагретый до 60–90 °С, диспергируют и эмульгируют добавкой небольшого количества эмульгатора в нагретом жидком нефтепродукте так, чтобы каждая капля (глобула) раствора была покрыта тонкой пленкой нефтепродукта. Особенностью изготовления эмульсий для ВВ является большое количество (94–95%) дисперсной фазы – раствора окислителя и соответственно очень малое количество (5–6%) дисперсионной среды – горючего и эмульгатора. Для газификации эмульсии и перевода ее в детонационноспособное состояние на месте применения ВВ используют водный раствор нитрита натрия.

Уникальные свойства ЭВВ (см. подразд. 1.1) позволили создать целую гамму взрывчатых композиций, отвечающих практически любым техническим требованиям потребителя [6]. В табл. 1.6 представлены три группы ЭВВ, отличающихся составом окислителей, применяемым горючим и энергетической добавкой. Для сравнения приведены характеристики известных штатных ПВВ – гранулотола и игданита.

К первой группе отнесены следующие модификации ЭВВ:

- *порэмиты*, содержащие раствор аммиачной и натриевой селитр и индустриального масла (ИМ-Н) или мазута (МТ-Н), раствор аммиачной и кальцевой селитр и индустриального масла (ИМ-К) или мазута (МТ-К);
- порэмит 1А, содержащий раствор аммиачной селитры и индустриального масла.

Порэмиты по удельной теплоте взрыва значительно уступают гранулотолу, однако при повышенной плотности заряжания скважин порэмитами концентрация энергии увеличивается до 3780 кДж/дм^3 (при плотности 1250 кг/м^3), приближаясь по уровню мощности к гранулотолу. Имеются возможности дальнейшего повышения плотности заряжания порэмита до 1350 кг/м^3, при этом концентрация энергии достигает 4070 кДж/дм^3. Указанные ВВ эффективны для взрывания пород средней крепости с любой степенью обводненности, в том числе и в проточной воде.

Таблица 1.6

Сравнительная характеристика штатных и эмульсионных ВВ разработки ГосНИИ «Кристалл» [6]

Название ВВ	Марка ВВ	Теплота взрыва, кДж/кг	Коннентрация энергии, кДж/дм^3	Плотность заряжания, кг/м^3	Скорость детонации, км/с	Газовая вредность, л/кг
Гранулотол		4116	4120	1000	5,0–5,2	275
Игданит		3864	3444	900	2,2–2,7	45
Порэмит 1	ИМ-Н	2894	3616	1250	4,9–5,2	12,2
	ИМ-К	2911	3633	1250	4,9–5,2	12,4
	МТ-Н	2978	3717	1250	4,9–5,2	11,8
	МТ-К	3049	3814	1250	4,9–5,2	12,0
Порэмит 1А		3024	3780	1250	4,9–5,1	40
Порэмит М	4А	3654	4746	1300	4,8–5,1	42
	8А	4368	5880	1350	4,9–5,3	54
Порэмит МК	8К	3822	5166	1350	4,8–5,2	40
	8КА	3780	4914	1300	4,8–5,1	46
Гранэмит	30/70	3360	4536	1350	4,9–5,2	38
	50/50	3507	4914	1400	4,8–5,2	36
	70/30	3654	4746	1300	3,5–4,0	34

Вторая группа ЭВВ повышенной мощности предназначена для взрывания крепких и весьма крепких пород. В их состав вводится энергетическая добавка – алюминиевый порошок в количестве 4–8% (порэмит М марок 4А и 8А) или гранулированный алюминиевый порошок, так называемый алюминиевый концентрат, в количестве 8% (порэмит МК марок 8К и 8КА). В качестве эмульсионной основы в первом случае используется порэмит 1, а во втором – порэмит 1 или порэмит 1А. Алюминиевый порошок или концентрат вводится в взрывную смесь либо при получении эмульсии, либо в момент приготовления взрывной смеси в зарядной машине на месте ее применения.

По мощности алюминизированные ВВ с учетом их высокой плотности могут значительно превосходить гранулотол по концентрации энергии в заряде, поэтому они пригодны для взрывания пород любой крепости.

Третья группа ЭВВ – *гранэмиты* представляют собой смесевые ВВ на основе порэмита (эмульсии) и гранулированной аммиачной селитры или игданита. Гранэмит 30/70 (70% эмульсии) можно получать не-

посредственно при производстве эмульсии и заряжать, например, скважины, используя зарядные машины. Гранэмиты 50/50 и 70/30 (соответственно 50 и 30% эмульсии) изготовляют в специальных зарядных машинах непосредственно при заряжении скважин на месте взрывных работ.

Гранэмиты, как видно из данных табл. 1.6, при плотности заряжания 1300–1400 кг/м^3 по мощности несколько превосходят гранулотол, поэтому их эффективно можно использовать при взрывных работах вместо гранулотола.

По скорости детонации гранэмиты находятся на уровне гранулотола (4,8–5,2 км/с), но имеют по сравнению с ними значительно меньший удельный объем вредных газовых выбросов (см. табл. 1.6).

За исключением гранэмита 70/30 эти ЭВВ обладают хорошей водостойкостью и могут сохранять свои взрывчатые свойства в обводненных условиях в течение месяца и более, что позволяет заряжать скважины вслед за их бурением.

Для сравнительной оценки в табл. 1.7 приведены некоторые характеристики зарубежных эмульсионных ВВ, рецептуры которых соответствуют российским ЭВВ по составу и соотношению компонентов. Приведенные в табл. 1.7 данные показывают, что мощностные характеристики (теплота взрыва) при одинаковых плотностях заряжания скважин зарубежные эмульсионные взрывчатые вещества находятся на уровне отечественных ЭВВ типа порэмита 1 и гранэмита. Если рассматривать максимальный достигнутый энергетический уровень ЭВВ, то видно, что максимальная концентрация энергии в зарубежных образцах значительно ниже по сравнению с российскими ЭВВ. В зарубежных образцах этот показатель составляет 4540 кДж/дм^3, в то время как для российских ЭВВ он значительно выше и достигает 5880 кДж/дм^3.

Для приготовления эмульсионных и гранулированных ВВ на месте проведения взрывных работ и заряжания скважин используются специальные смесительно-зарядные машины (рис. 1.2). Машина СЗМ-10Г предназначена для окончательного приготовления и заряжения ВВ типа гранемита [10].

Смесительно-зарядная машина фирмы «IRECO» (США) способна заряжать скважину эмульсиями ВВ с помощью шлангового нагнетателя (рис. 1.3,*а*) или заполнять ее сыпучими смесевыми композициями ЭВВ с гранулированными окислителями и горючими добавками с помощью шнекового устройства (рис. 1.3, *б*).

Смесительно-зарядные машины могут обеспечивать как транспортировку готовых взрывчатых смесей к месту ведения взрывных работ со стационарных пунктов приготовления ВВ, так и раздельную транспортировку компонентов ВВ с последующим приготовлением взрывчатых смесей и заряжанием скважин на месте ведения взрывных работ.

Таблица 1.7

Характеристика зарубежных эмульсионных ВВ [6]

Страна (фирма)	Марка ВВ	Теплота взрыва, кДж/кг	Концентрация энергии, кДж/дм^3	Плотность заряжания, кг/м^3	Скорость детонации, км/с
США					
("Atlas")	Apex	2848	3562	1250	5,0–5,2
	Power AN	3318	4313	1300	4,8–5,3
("IRECO")	Iregel	2822	3385	1200	5,0–5,2
	Iremex	3150	4250	1350	4,9–5,2
("Du Pont")	Tovex E	2856	3570	1250	4,5–5,0
	Toven E	3360	4536	1350	4,0–5,0
Швеция					
("Nitro-Nobel")	Emulit	2906	3486	1200	4,8–5,2
	Emulan	3045	3956	1300	4,2–5,0
Канада					
("ETI")	Tovex	2805	3364	1200	5,0–5,5
	Tovan	3024	4082	1350	4,8–5,1
Германия					
("WestSpreng")	Emulgit	2856	3712	1300	4,9–5,4
Китай	BME	2877	3452	1200	4,0–5,0
Финляндия					
("Kemira")	Kimit	3150	3780	1200	4,0–5,2
Япония					
("Nippon & Fast")	Chita-Mite	2940	3381	1150	5,0–5,5

Жидкие ПВВ. По структуре и составу жидкие ПВВ можно разделить на две группы: смеси на основе жидких нитроалканов и на основе солей гидразина [7].

Из *жидких нитроалканов* особое внимание уделяется нитрометану, который предназначен для внутрипластового взрывания при проведении взрывных работ в нефтедобывающей промышленности.

На основе загущенного нитрометана и измельченной аммиачной селитры или в смеси с алюминиевым порошком можно готовить пластичные плотные и водоустойчивые ВВ, не уступающие по мощности динамитам и в то же время отличающиеся от них низкой чувствительностью к механическим воздействиям, малой токсичностью, высокой морозостойкостью и меньшей стоимостью.

Рис. 1.2. Смесительно-зарядные машины
а – первая отечественная (СССР); *б* – СЗМ-10Г (Россия)

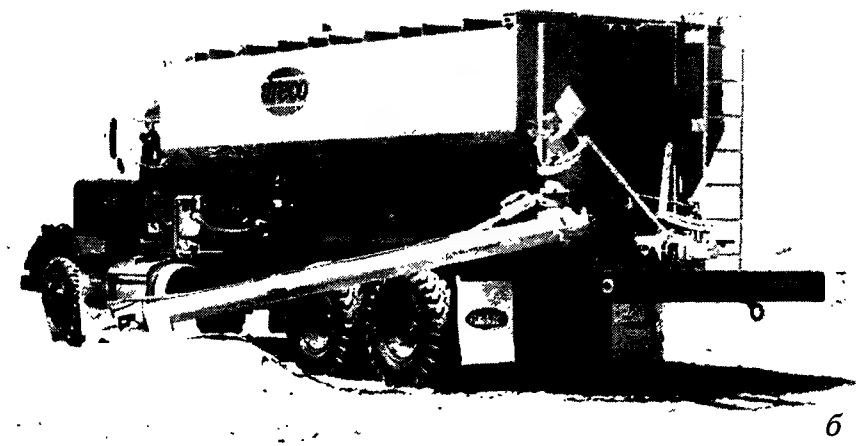


Рис. 1.3. Смесительно-зарядная машина фирмы «IRECO» (США) в моменты заряжания скважины с помощью. шлангового нагнетателя (*а*) и шнекового устройства (*б*)

Смеси на основе *гидрата гидразина* ($NH_2NH_2H_2O$) характеризуются высокими расчетными энергетическими показателями. Известны простейшие смеси гидразина с аммиачной селитрой, а также многокомпонентные жидкие ВВ.

В нашей стране ВВ на основе жидких нитроалканов и гидразина не нашли пока широкого практического применения для промышленных взрывных работ.

Взрывчатые вещества на основе твердых и жидких окислителей. Кроме аммиачной селитры, в состав ПВВ в качестве окислителя могут быть введены другие жидкие и твердые соединения.

Хлоратные и перхлоратные ВВ – это смеси, в которых в качестве окислителя используются соли *хлорноватой* или *хлорной кислот* (перхлораты или хлораты) [1]. Взрывчатые смеси, содержащие перхлоратные или хлоратные соли, отличаются высокой токсичностью продуктов взрыва, повышенной чувствительностью к трению и удару. По этой причине в нашей стране они не применяются.

Взрывчатые вещества на осиове жидких окислителей – это *оксиликвиты* и смеси на основе *двуокиси азота* или *концентрированной азотной кислоты* [7].

Оксиликвиты представляют собой патроны из горючего компонента – поглотителя, пропитываемого перед применением жидким кислородом [1].

В настоящее время в нашей стране эти ВВ для взрывных работ не используются.

Подробный перечень взрывчатых материалов, допущенных Госгортехнадзором России к применению в Российской Федерации, изложен в [11].

Литература

1. *Горст А.Г.* Пороха и взрывчатые вещества. – М.: Машиностроение, 1972. – 205 с.

2. *Кук М.А.* Наука о промышленных взрывчатых веществах. – М.: Недра, 1980. – 455 с.

3. *Орлова Е.Ю.* Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. – М.: Химия, 1981. – 311 с.

4. *Светлов Б.С., Яременко Н.Е.* Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. – М.: Недра, 1973. – 216 с.

5. *Жученко Е.И., Иоффе В.Б., Кукиб Б.Н.* и др. Эмульсионные взрывчатые вещества: Сб. науч. трудов / РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М., 2000. – С. 339–349.

6. *Работинский Н.И., Сахинов Р.Х., Сосин В.А.* Новые экологически безопасные и эффективные промышленные ВВ в России и за рубежом // Горный журнал. 1996. № 11–12. – С. 46–48.

7. *Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И.* Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1973. – 320 с.

8. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период / Под ред. Н.Г. Пузырева.– СПб.: Гуманистик, 2001. – 928 с.

9. *Шеменев В.Г., Павлютенков В.М.* Водосодержащие взрывчатые вещества: Состояние разработки, перспективы использования // Горный журнал. 1996. № 11–12. – .С. 48.

10. КНИИМ: История, события, люди / Под ред. Б.В. Мацеевича. – Красноармейск: ФГУП КНИИМ, 2002. – 320 с.

11. Перечень взрывчатых материалов, оборудования и приборов взрывного дела, допущенных к применению в Российской Федерации. Сер. 13. Вып. 2 / Кол. авт. – М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 80 с.

ГЛАВА 2

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

2.1. Классификация дисперсных смесей

Анализ составов ПВВ показал, что по своей структуре они представляют собой как *гомогенные, однородные* или *однофазные* смеси (жидкие ПВВ), так и *гетерогенные, неоднородные* или *многофазные* смеси – это газовзвеси, эмульсии, суспензии, композитные материалы. В подавляющем большинстве случаев ПВВ характеризуются, в отличие от гомогенных смесей (смесей растворов), наличием макроскопических (по отношению к молекулярным масштабам) неоднородностей или включений. В гомогенных же смесях составляющие перемешены на молекулярном уровне. Промежуточное положение между гетерогенными и гомогенными смесями занимают *коллоидные* смеси (коллоиды) и *мицеллярные* растворы.

Из возможных гетерогенных смесей промышленных взрывчатых веществ наибольшее практическое применение нашли смеси, имеющие сравнительно регулярную структуру, – так называемые *дисперсные смеси*; они состоят из двух фаз, одна из которых – твердые частицы, капли или газовые пузырьки.

С этих структурно-феноменологических позиций различают следующие виды дисперсных смесей ПВВ:

- *загущенные суспензии* – гелеобразные ВВ (сларри), представляющие собой структурированную смесь жидкой среды с твердыми частицами;
- *полимерные композиты* – пластичные и эластичные ВВ, представляющие собой дисперсию твердых частиц в полимерной основе (матрице);
- *эмульсии* – ЭВВ, представляющие собой смеси жидкости с каплями другой жидкости;
- *газовзвеси* или *аэровзвеси* – сыпучие ВВ, представляющие собой смеси газа с твердыми частицами.

В научной литературе по механике всякую дисперсную смесь называют суспензией.

Капли, пузырьки, твердые частицы в дисперсной смеси называют *дисперсными частицами* или *дисперсной фазой*, а окружающую сплошную фазу – *дисперсионной средой.*

2.2. Структура и структурные связи сыпучих промышленных взрывчатых веществ [1–4]

Состав и строение твердых дисперсных сред. Из возможных гетерогенных смесей ПВВ особое место занимают искусственно созданные *твердые дисперсные смеси*, в которых твердые частицы образуют по контактным поверхностям единый каскад (скелет). Такая структура обеспечивает определенную подвижность (текучесть) смеси в свободном насыпном состоянии под действием гравитационных сил. Вот почему подобную смесь еще называют – *сыпучий материал* или *сыпучее тело.*

В зависимости от среднего размера частиц d сыпучий материал может быть в следующих условных состояниях: *пылевидном* ($d < 0{,}05$ мм); *порошкообразном* (0,05 мм $< d <$ 0,5 мм); *мелкозернистом* (0,5 мм $< d <$ 5 мм); *крупнозернистом* (5 мм $< d <$ 10 мм); *кусковом* ($d >$ 10 мм). Особую группу составляют *ультрадисперсные материалы* с ориентировочными размерами частиц $(10^{-6} \div 10^{-5})$ мм $< d < 10^{-3}$ мм.

Естественно, что в реальных производственных условиях сыпучие материалы, как правило, составляют полидисперсные системы твердых частиц.

Входящие в состав ПВВ сыпучие материалы получают в основном механическим измельчением твердых веществ (размол в мельницах или статическое сжатие со сдвигом); кристаллизацией из растворов и расплавов; выделением из суспензий и газовзвесей; электролизом из растворов и расплавов; термодиффузионным насыщением; термической диссоциацией газовых соединений и др. Впоследствии стали применять метод ударно-волнового воздействия. Прохождение ударных волн через кристаллы доводит домены до размеров $\leqslant$10 нм. Переход от ударного воздействия к детонационному превращению твердых тел приводит к дальнейшему уменьшению размеров частиц [1].

В самом общем случае скелет сыпучих ПВВ представляет сложный конгломерат компактно расположенных твердых дисперсных частиц, которые могут иметь различную природу, размеры, форму и ориентацию в пространстве. Частицы могут быть несвязанными между собой (*несвязный сыпучий материал)* или связанными (*связный сыпучий материал*), прочность связей которых, как правило, во много раз меньше прочности самих частиц.

В неуплотненном насыпном состоянии частицы контактируют лишь в отдельных точках или по поверхностям малых размеров, обра-

зуя пористую структуру, свободное пространство которой заполнено газообразными или частично жидкими веществами. Если пространство между частицами (поры или поровый объем) заполнено полностью газом (воздухом) или жидкостью, то такие твердые дисперсные среды называют *двухфазными*. В случае, когда поры заполнены газом и частично жидкостью, их называют *трехфазными*.

Под действием внешних силовых факторов происходит деформирование первоначальной структуры сыпучей среды, и дальнейшее поведение таких материальных систем определяется их сопротивлением происходящим при этом процессам уплотнения и упрочнения, когда весь объем материала или главная структурная его часть остается в твердом состоянии на всем протяжении силового воздействия. Такое поведение сыпучих материалов обусловлено совокупностью свойств структуры *зернисто-пористого тела* (твердого пористого тела) при различной степени их уплотнения.

С самого начала подчеркнем, что именно структура и структурные связи определяют физическую сущность механических процессов, связанных как с движением (течением) сыпучих материалов, так и с их способностью под действием давления достигать различной степени уплотнения и *агломерирования* (компактирования) дискретных частиц. Если ввести понятие «структурная механика сыпучих сред», то именно с этих позиций должны изучаться закономерности поведения сыпучих материалов, исходя из органической связи физико-механических свойств пористого тела с его структурой и ее изменениями в процессе деформирования.

Компоненты структуры. Твердая часть сыпучих ПВВ состоит из отдельных частиц и их агрегатов, зерен и обломков кристаллического или аморфного строения.

Элементы *кристаллической структуры* характеризуются пространственной периодичностью в расположении равновесных положений атомов. Правильное чередование атомов на одних и тех же расстояниях друг от друга повторяется для сколь угодно отдаленных атомов, т.е. существует *дальний* и *ближний* порядок упорядоченности. Основным признаком дальнего порядка является *симметрия кристаллов*.

В *аморфных телах* атомы колеблются вокруг хаотически расположенных точек. Устойчивым состоянием (с минимальной внутренней энергией) твердых тел является кристаллическое состояние. Поэтому с термодинамической точки зрения аморфное тело находится в метастабильном состоянии. Это твердое состояние вещества характеризуется изотропией свойств и отсутствием точки плавления. При повышении температуры аморфное вещество размягчается и переходит в жидкое состояние постепенно. Эти особенности обусловлены отсутствием у веществ в аморфном состоянии строгой периодичности, присущей кристаллам в расположении атомов, ионов, молекул и их групп на

протяжении сотен и тысяч периодов. В то же время у веществ в аморфном состоянии существует согласованность в расположении соседних молекулярных частиц, т.е. в отличие от кристаллов существует только ближний порядок. Поэтому твердое тело в аморфном состоянии можно рассматривать как переохлажденную жидкость с очень высокой вязкостью (*стеклообразное состояние*).

В природе аморфное состояние твердых тел менее распространено, чем кристаллическое. В аморфном состоянии могут находиться, например, янтарь, смолы, битумы и полимеры.

В состав твердых структурных элементов ВВ могут входить органические вещества, например, флегматизаторы и различные технологические составляющие (например, горючие вещества в составах АМ–ДТ).

В качестве флегматизаторов обычно используются маслянистые легкоплавкие вещества, обладающие хорошей обволакивающей способностью, высокой теплоемкостью и химически не взаимодействующие с твердыми частицами взрывчатого вещества. Для флегматизации высокочувствительных и опасных для механической переработки в чистом виде взрывчатых веществ используют парафин, церезин, синтетический воск и др. Флегматизатором мощных бризантных взрывчатых веществ, как правило, имеющих повышенную чувствительность к механическим воздействиям, является также тринитротолуол – само взрывчатое вещество, но с более низкой температурой плавления и меньшей чувствительностью к удару и трению. Флегматизаторы образуют на поверхности частиц пленки или вяжущие покрытия. Одновременно они являются связующими веществами, способствующими агломерированию твердых частиц при уплотнении давлением [2].

Жидкие вещества в сыпучих смесях либо присутствуют как необходимая технологическая составляющая данной рецептуры, либо содержатся в твердых компонентах и поровом пространстве.

Различают следующие формы связи жидкости с твердым материалом (в порядке убывания энергии связи): *химическую* (строго определенное стехиометрическое соотношение жидкости и сухого вещества), включающую ионную и молекулярную связи; *физико-химическую* (различные, но не строго определенные соотношения), включающую адсорбционную и осмотическую связи; *физико-механическую* (неопределенное соотношение жидкости и сухого вещества).

Химически связанная жидкость (влага) представляет собой воду гидрата, прочно связанную с твердым веществом в виде гидроксильных ионов (ионная связь), и воду молекулярных соединений типа кристаллогидратов, связанную слабее (молекулярная связь).

Адсорбционная связанная влага образуется за счет адсорбции молекул пара из окружающей газовой среды под действием молекулярного силового поля на наружной поверхности материала и на поверх-

ности его пор. На поверхности твердого тела образуется поверхностный мономолекулярный слой адсорбированной влаги (гидратная оболочка), который связывается наиболее сильно. Последующие слои связанной жидкости (полимолекулярная адсорбция) удерживаются менее прочно, а свойства ее постепенно приближаются к свойствам свободной жидкости. Адсорбционная связь влаги с сухим веществом характеризуется энергией связи средней интенсивности.

Осмотическая связанная влага находится внутри структурного скелета твердых частиц и удерживается осмотическим давлением, обусловливающим избирательную диффузию жидкости из окружающей среды через полупроницаемую оболочку. Осмотическая связь характеризуется энергией связи слабой интенсивности.

Влага физико-механической связи представляет собой жидкость, находящуюся в порах и капиллярах материала, и жидкость смачивания на поверхности твердых частиц. Это может быть маточный раствор, раствор перекристаллизационной среды (если при получении твердых частиц использовали процесс перекристаллизации), водные растворы, применяемые в процессах промывки и охлаждения, а также различные примеси. Такие жидкости механически связаны с материалом и наиболее легко удаляются.

Давление пара над поверхностью материала частиц тем меньше, чем прочнее связь между жидкостью и материалом. Наиболее прочная эта связь у гигроскопичных веществ. Так, аммиачная селитра способна сорбировать влагу из атмосферы, образуя на твердой поверхности пленки прочно связанной адсорбционной воды. Резкой границы между отдельными видами связи жидкости с твердым телом не существует. Один вид связи постепенно уменьшается за счет преобладания другой.

Наличие жидкой фазы, а также влажность самих твердых частиц оказывают существенное влияние на его физико-механические свойства и характер деформационного поведения при уплотнении давлением. В материальных системах, сохраняющих свойства сыпучих тел, количество вводимых жидких веществ невелико. Этого количества жидкости хватает только на частичное обволакивание соприкасающихся частиц. Как правило, эти жидкие компоненты являются связующими веществами и находятся в свободном состоянии.

Содержание остаточной влажности в выпускаемых заводами взрывчатых веществах регламентируется. Она составляет, например, для тринитротолуола (тротила) – $C_6H_2CH_3(NO_2)_3$ не более 0,08–0,1%. В аммиачной селитре – NH_4NO_3 заводского производства массовая доля влаги не более 0,9% (действительная влажность иногда достигает 2,5–5%).

Газообразные включения (пары, газы) постоянно содержатся в сыпучих средах в свободном и растворенном видах. Растворен-

ные газы находятся и в составе жидких связующих и флегматизирующих веществ. Они влияют на структуру этих веществ и ощутимо реагируют на изменение температуры и давления.

Часть свободных газов может сообщаться с атмосферой (собственно свободные), часть находится в замкнутом массиве пористого тела (защемленные газы). Эти газы являются основными, они заполняют поры, трещины и т.п.

В неуплотненном насыпном состоянии поры сыпучего материала заполняются главным образом воздухом, соединяющимся с атмосферой. В процессе механического уплотнения сыпучих материалов и уменьшением их пористости увеличивается доля защемленного газа.

Наличие защемленных и растворимых газов в структуре сыпучих тел может существенно влиять на процесс их деформирования, обусловливая сжимаемость жидких и пластичных связующих веществ и свойства пористых тел в целом.

Формы и размеры твердых частиц. Формы и размеры кристаллов в природе чрезвычайно разнообразны. Изучением их занимается наука кристаллография. При описании правильной внутренней структуры кристаллов обычно пользуются понятием *кристаллической решетки.* Кристаллическая решетка представляет собой пространственную сетку, в узлах которой располагаются частицы (атомы, ионы, молекулы), характеризующаяся периодической повторяемостью в трех измерениях. Плоские грани кристалла, образовавшегося в равновесных условиях, соответствуют атомным плоскостям, ребра – рядам атомов. Существование кристаллической решетки объясняется тем, что равновесие сил притяжения и отталкивания между атомами, соответствующее минимуму потенциальной энергии системы, достигается при условии трехмерной периодичности.

Для определения свойств кристаллической решетки достаточно знать размещение атомов в ее *элементарной ячейке.* Повторением параллельных переносов (трансляций) этой ячейки образуется кристаллическая решетка.

Элементарная ячейка имеет форму параллелепипеда с характерным для данной решетки расположением атомов (рис. 2.1). В элементарной ячейке может размещаться от одного атома (химические элементы) до 10^2 (химические соединения) и $10^3 \div 10^6$ атомов (белки, вирусы). В соответствии с этим длины ребер (периоды) кристаллической решетки различны от нескольких до сотен и тысяч ангстрем. Любому атому в данной ячейке соответствует трансляционно-эквивалентный атом в каждой другой ячейке кристалла.

Если взять большое число одинаковых кристаллических ячеек и вплотную уложить их в определенном объеме, сохраняя параллельность ребер и граней, то получим пример строения идеального *монокристалла.*

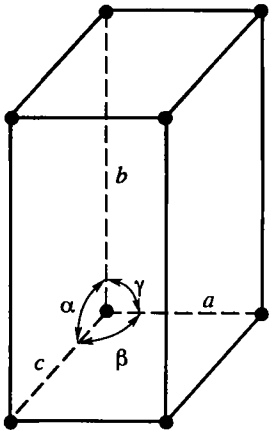


Рис. 2.1. Элементарная ячейка кристаллической решетки

Важнейшим геометрическим свойством кристаллов, кристаллических решеток и их элементарных ячеек является симметрия по отношению к определенным направлениям (осям) и плоскостям. Число возможных видов симметрии ограничено.

По внешней форме ячейки в зависимости от углов между ее гранями α, β, γ и от соотношения между длинами ребер a, b, c различают семь кристаллических систем (*сингоний*): кубическую, тетрагональную, гексагональную, тригональную, ромбическую, моноклинную, триклинную. Являясь наиболее крупным классификационным подразделением в *симметрии кристаллов*, каждая сингония по признаку точечной симметрии включает несколько групп (*Браве решетки*, всего 14) и (*Федоровские пространственные группы*, всего 230).

В кристаллах *кубической системы* все углы элементарной ячейки прямые и все ребра равны между собой ($\alpha = \beta = \gamma = 90°$, $a = b = c$).

Простейшая ячейка *тетрагональной системы* представляет собой прямоугольный параллелепипед, в основании которого лежит квадрат. От соответствующих решеток кубической системы их отличает только неравенство ребер ($\alpha = \beta = \gamma = 90°$, $a = c \neq b$).

Элементарная ячейка *гексагональной системы* представляет собой прямую призму, в основании которой лежит ромб с углами 60 и 120°. Два угла между осями прямые, а один равен 120° ($\alpha = \gamma = 90°$, $\beta = 120°$). Высота элементарной призмы не равна длине стороны ромба, лежащего в основании ($a = c \neq b$).

В *тригональной системе* элементарная ячейка представляет собой ромбоэдр, система имеет и другое название – ромбоэдрическая. Углы α, β, γ одинаковы, отличные от 90° и меньше 120°; при этом $a = b = c$.

Элементарная ячейка *ромбической системы* представляет собой прямоугольный параллелепипед с различной длиной ребер ($\alpha = \beta = \gamma = 90°$, $a \neq b \neq c$).

В *моноклинной системе* элементарная ячейка представляет собой наклонный параллелепипед, две пары граней которого являются прямоугольниками, а одна пара параллелограммом. Одно ребро ячейки перпендикулярно к двум другим ($\alpha = \beta = 90°$, $\gamma \neq 90°$; $a \neq b \neq c$).

Триклинная система имеет элементарную решетку, все ребра которой различны ($a \neq b \neq c$) и углы не равны между собой ($\alpha \neq 90°$, $\beta \neq 90°$, $\gamma \neq 90°$).

Современные методы структурного анализа кристаллов (*рентгеновский структурный анализ, электронография, нейтронография*) позволяют определить расположение атомов в элементарной ячейке кристаллов (расстояния между ними), параметры тепловых колебаний кристалла, распределение электронной плотности между атомами, ориентацию их магнитных моментов и т.п.

Периоды элементарной ячейки кристаллов для химических элементов и простейших соединений весьма малы и составляют всего десятые доли нанометра. Для сложных неорганических и органических соединений они достигают 1–3 нм, а для биологических кристаллов (кристаллы белков и вирусов) – 10–200 нм.

Неравновесные условия процесса кристаллизации приводят к различным отклонениям формы кристалла от правильного многоугольника – к округлости граней и ребер, возникновению пластинчатых, игольчатых, нитевидных, ветвистых (дендритных) кристаллов. Это используется в технике выращивания различных форм кристаллов. Если в объеме расплава образуется сразу большое число центров кристаллизации, то разрастающиеся кристаллы, контактируя друг с другом, приобретают форму неправильных *кристаллических зерен*.

Большинство твердых материалов являются *поликристаллическими*. Они состоят из множества отдельных беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зерен (кристаллитов), внутри которых неизменными сохраняются направления кристаллографических осей.

Свойства поликристаллических тел обусловлены средним размером зерен – от $(1 \div 2)\cdot 10^{-6}$ м до нескольких миллиметров, их ориентацией и границами между соприкасающимися зернами. Если зерна ориентированы хаотически, а их размеры малы по сравнению с размером поликристаллического тела, то в них не проявляется анизотропия свойств, характерная для монокристаллов. Если есть преимущественная кристаллографическая ориентация зерен, то поликристалл является *текстурированным* и в этом случае он обладает анизотропией. Наличие границ между зернами существенно сказывается на физических, особенно механических, свойствах поликристаллического тела, так как на них происходят торможение различных *дислокаций*, зарождение трещин и т.п.

Реальные кристаллические тела всегда имеют неоднородное распределение примесей (твердых и газообразных), маточных расплавов и растворов, трещины и структурные дефекты – вакансии и дислокации, ухудшающие их прочностные и другие физико-механические характеристики.

От формы и размеров кристаллических частиц, составляющих твердые дисперсные смеси, существенно зависят физические и механические свойства кристаллических тел. Так, твердые нитросоединения ароматического ряда: тринитротолуол (тротил) – $C_6H_2CH_3(NO_2)_3$,

динитронафталин – $C_{10}H_8(NO_2)_2$ и другие формируются в кристаллы обычно моноклинной системы, реже ромбической и еще реже триклинной. Если в кристаллической ячейке 2–16 молекул, то они располагаются вытянутыми, плотно упакованными слоями. Благодаря такому строению в кристаллах нитросоединений ароматического ряда сравнительно легко осуществляется перемещение слоев по поверхностям скольжения; они обладают повышенной пластичностью по сравнению с нитросоединениями жирного ряда.

Нитропроизводные гетероциклических аминов: циклотриметилентринитрамин (гексоген) – $C_3H_6O_6N_6$, циклотетраметилентетранитрамин (октоген) – $C_4H_8O_8N_8$ и другие в основном имеют кристаллы ромбической системы, которые не образуют плотных слоев и имеют ограниченные возможности к взаимному скольжению слоев. Поэтому вещества этого класса малопластичные и проявляют хрупкие свойства. Так, микроскопическая твердость кристаллов гексогена при температуре 20 °С составляет 0,32–0,48 МПа, а микроскопическая твердость тротила 0,07–0,09 МПа [4].

Таким образом, плохую податливость к прессованию чистого гексогена можно объяснить структурой кристаллов и отсутствием пластического пограничного слоя поликристалла.

Представитель твердых эфиров азотной кислоты: пентаэритриттетранитрат (ТЭН) – $C(CH_2ONO_2)_4$ образует кристаллы тетрагональной системы. Микроскопическая твердость кристаллов ТЭНа около 0,18 МПа, они очень хрупкие и непрочные. Этим отчасти объясняется его плохая податливость к прессованию.

Строение кристаллов солей азотной и хлорной кислот рассмотрим на примере нитрата аммония (аммиачной селитры – NH_4NO_3) и перхлората аммония – NH_4ClO_4.

Аммиачная селитра обладает свойством *полиморфизма* (состояния с различной атомно-кристаллической структурой) и может существовать в пяти кристаллических модификациях: кубической, тетрагональной, ромбической, ромбической бипирамидальной, гексагональной. Это сильно гигроскопическое соединение, хорошо адсорбирующее окружающую влагу и образующее на поверхности насыщенный раствор. При испарении влаги (в случае уменьшения относительной влажности воздуха) из насыщенного раствора выделяются кристаллы, которые скрепляют соприкасающиеся частицы селитры. В результате повторного увлажнения и высыхания кристаллы селитры все прочнее связываются, теряется сыпучесть и материал самопроизвольно уплотняется до монолита или крупных кусков. Процесс самопроизвольного уплотнения (слеживания) аммиачной селитры является следствием главным образом ее гигроскопичности и полиморфизма [2].

Аммиачная селитра выпускается промышленностью в крупнокристаллическом и гранулированном видах. Размер кристаллов изменяет-

ся от 2 ÷ 2,5 до 0,22 мм и даже меньше. Диаметр сферических гранул порядка 2 ÷ 4 мм.

Перхлорат аммония в зависимости от температуры может образовывать кристаллы двух модификаций: ромбическую и кубическую. Его кристаллы склонны к хрупкому разрушению. Перхлорат аммония гигроскопичен, хотя и в меньшей степени (примерно в 10 раз), чем аммиачная селитра, склонен к процессу слеживания.

В большинстве случаев взрывчатые вещества заводского производства представляют собой поликристаллические формирования (агрегаты), получаемые при кристаллизации из растворов и расплавов. При кристаллизации из расплава тринитротолуола и других смесей на его основе готовый продукт получают в виде чешуек или гранул размером 2–3 мм. Тонкие многоугольные чешуйки имеют размеры примерно 5 × 5 × 0,5 мм, т.е. их толщина в 10 раз меньше их большего размера. Гранулы имеют форму, близкую к сфере; диаметр гранул изменяется от 1 до 3 мм.

Гексоген, изготовленный в промышленных условиях кристаллизацией из раствора, имеет частицы 0,01–0,83 мм.

Порошки металлов, используемые в производстве промышленных взрывчатых веществ, обычно имеют размеры 0,05–0,50 мм.

Гранулометрический состав. Сыпучие взрывчатые вещества лишь в редких случаях состоят из одинаковых по размеру и форме частиц. Бóльшая часть используемых в производстве сыпучих материалов представляет собой полидисперсные системы отдельных частиц, различающихся как формой, так и размерами.

Частицы неправильной формы характеризуют диаметром условной сферы $d_э$, эквивалентной объему частицы $V_ч$,

$$d_э = (6V_ч/\pi)^{1/3}. \qquad (2.1)$$

Реальная форма частиц учитывается фактором формы $Ф$, являющимся отношением поверхности шара, объем которого равен объему частицы, к фактической поверхности частицы $S_ч$,

$$Ф = 6/(S_у d_э), \qquad (2.2)$$

где $S_у$ – удельная поверхность частицы; $S_у = S_ч/V_ч$.

Фактор $Ф \leqslant 1$; $Ф = 1$ для частиц сферической формы. Он может быть рассчитан по формуле (2.2) для частиц, имеющих изометрические и канонические геометрические формы. Для частиц неправильной формы параметр $Ф$ находят из формул (2.1) и (2.2) по экспериментальным значениям удельной поверхности частиц $S_у$. Для определения удельной поверхности твердых дисперсных материалов применяют методы, основанные на зависимости значения гидравлического со-

противления, адсорбции и других параметров от поверхности контакта. Наиболее широко используется метод определения удельной поверхности дисперсных тел по стационарной фильтрации разряженных газов, предложенный акад. Б.В. Дерягиным (1958 г.).

Экспериментальные значения параметра Φ для частиц различной формы материалов химической технологии приведены в работе [3]; рекомендуется принимать для округлых частиц $\Phi = 0{,}77$, для частиц угловатой формы – 0,66, для продолговатых частиц – 0,58, для пластинчатых частиц – 0,43.

Удельная поверхность частиц используется для характеристики таких свойств дисперсного материала, как теплопроводность, звукопроницаемость, растворимость, химическая активность, т.е. в случаях, когда свойства материала в значительной степени зависят от площади поверхности его частиц.

Для твердых дисперсных материалов значения S_y меняются в большом диапазоне (от нескольких тысяч до нескольких миллионов метров в минус первой степени) в зависимости от степени дисперсности частиц.

Реальные сыпучие материалы состоят, как правило, из частиц разного размера. Для оценки степени дисперсности сыпучих материалов используются различные характеристики: наибольший d_{max} и наименьший d_{min} размеры частиц, отношение наибольшего размера частиц к наименьшему (так называемый размах варьирования), средний размер (эквивалентный диаметр) частиц, удельную поверхность частиц S_y, гранулометрический состав.

Из различного рода средних параметров, характеризующих полидисперсную систему, применительно к сыпучим материалам наиболее распространен *статистический среднемассовый диаметр d*. Его рассчитывают как среднее арифметическое эквивалентных диаметров частиц различных фракционных классов, на которые разбивается весь диапазон полидисперсного распределения частиц по размерам

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{k} d_{эi} G_i}{\sum_{i=1}^{k} G_i}, \qquad (2.3)$$

где $d_{эi}$ – среднее значение эквивалентного диаметра частиц i-го фракционного класса; G_i – масса частиц i-го фракционного класса; k – число фракционных классов, на которые разбита вся шкала $d_э$ (обычно принимают $k = 5 \div 10$).

Гранулометрический или *дисперсный состав* сыпучего материала – характеристика, показывающая, какую долю или процент по массе,

объему, поверхности или числу частиц составляют определенные по размеру частицы или группы частиц во всей массе анализируемой пробы. Для экспериментального определения гранулометрического состава наиболее часто используют ситовой, седиментационный, гидродинамический или аэродинамический, микроскопический методы анализа. Диаметр частиц сыпучего материала рассматривают как случайный одномерный показатель, а для описания его гранулометрического состава чаще всего используют методы статистической математики.

Результаты экспериментального определения $d_{эi}$ для всех k фракционных классов, на которые разбита шкала значений $d_э$ анализируемого материала, позволяют построить гистограмму, наглядно характеризующую его гранулометрический состав, или определить вид и параметры аналитического закона распределения частиц в массе сыпучего материала (по диаметру, массе, поверхности, числу).

Среднее значение эквивалентного диаметра частиц $d_{эi}$ рассчитывается как среднегеометрическая или среднеарифметическая величина двух граничных размеров частиц (d_1, d_2) i-го фракционного класса (например, размеров ячеек смежных сит)

$$d_{эi} = \sqrt{d_1 d_2} \text{ или } d_{эi} \frac{d_1 + d_2}{2}.$$

Дифференциальная кривая распределения частиц по размерам (рис. 2.2, *а*) характеризует содержание $\varphi(d)$ (в долях или процентах) фракции частиц размером d. Для удобства практических расчетов дифференциальная кривая может быть изображена в виде гистограммы –

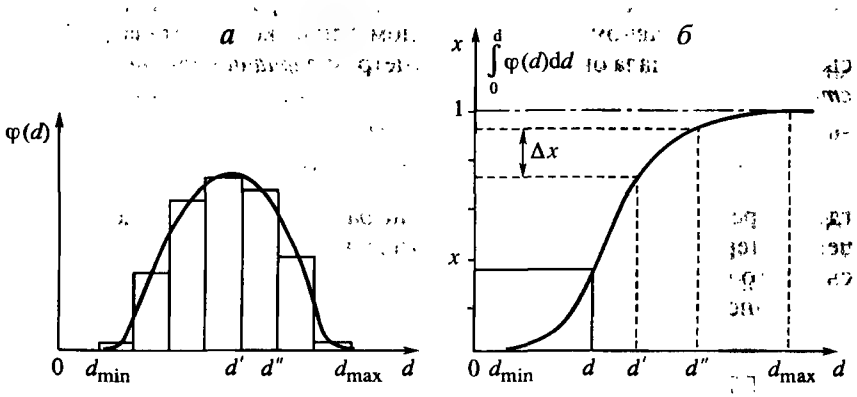


Рис. 2.2. Гистограммы распределения дискретных частиц по размерам:
а – лифференциальная кривая распределения; *б* – интегральная кривая распределения

последовательности прямоугольных площадок, ординаты которых определяют содержание $\varphi(d)$ фракций частиц на малом интервале размеров между d' и d'' в общем диапазоне размеров частиц от d_{min} до d_{max}. *Интегральная кривая распределения частиц по размерам* (рис. 2.2, *б*) показывает по ординате накопленную частность, т.е. долю (обычно – массовую) частиц $x = \int_{d_{min}}^{d} \varphi(d)\mathrm{d}d$ размерами от минимального d_{min} до текущего d. Доля частиц в диапазоне диаметров от d' до d'', т.е. относительное количество данной фракции в смеси, выражается отрезком Δx на ординате этой кривой. Средний размер узкой фракции определяют как среднегеометрическое значение $d = \sqrt{d'd''}$, или как среднеарифметическое значение из d' и d'' (для приближенных расчетов).

С помощью кривых распределения (или кривых гранулометрического состава) легко найти содержание каждой достаточно узкой фракции в смеси.

Гистограммы дают общую картину распределения частиц по размерам. Чем уже интервал, в котором заключены размеры частиц, тем ближе материал к монодисперсному состоянию. Наоборот, чем ниже максимум на гистограмме и шире интервал размеров частиц, тем более полидисперсным является анализируемый материал.

В случаях, когда необходимо более точно отобразить вклад фракций с наименьшими значениями $d_э$, принимают разные интервалы фракционных классов: уменьшают в сторону $d_{э\ min}$ и соответственно увеличивают в сторону $d_{э\ max}$, как правило, в геометрической прогрессии. При построении гистограмм с изменяющимся интервалом значений $d_э$ отдельных фракций по оси ординат откладывают отношение содержания фракций к соответствующему интервалу значений $d_э$.

Степень неравномерности гранулометрического состава в объеме сыпучего материала оценивают параметром *вариации* или *неоднородности*

$$V(d) = s/d_{ср},$$

где s – среднеквадратичное отклонение размера частиц в объеме сыпучего материала; $d_{ср}$ – среднестатистический размер частиц в объеме сыпучего материала.

Среднеквадратичное отклонение

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i - d_{ср})^2}{n-1}},$$

где d_i – статистический среднемассовый диаметр частиц в i-й пробе;
n – число проб.

Размер

$$d_{ср} = \sum_{i=1}^{n} d_i.$$

Значения параметра неоднородности находятся в интервале $0 < V(d) < 1$; с уменьшением значения $V(d)$ степень неравномерности гранулометрического состава по объему сыпучего материала становится меньше. Часто параметр $V(d)$ умножают на 100 и тогда его рассчитывают в процентах.

Взаимодействие между частицами. В дисперсных системах сыпучих материалов каждая частица находится под действием системы внешних и внутренних сил и возбуждаемых ими энергетических полей. Внешние поля возникают за счет действия приложенной к материалу нагрузки (давления) и гравитационных сил. Внутренние поля возбуждаются межчастичными силами, источниками которых являются сами структурные элементы материала – отдельные частицы, формирующие массив вещества.

В общем случае могут в той или иной степени проявиться следующие виды физических и химических связей между частицами: силы химической природы, молекулярные силы, ионно-электрические силы, капиллярные, электростатические (кулоновские), магнитные силы и силы механического сцепления.

Перечисленные силы взаимодействия на поверхности контакта двух однородных тел в литературе часто обобщают и называют *аутогезионными*, а силы взаимодействия при контакте разнородных тел – *адгезионными*.

Проявление указанных сил может вызвать следующие механизмы связывания между частицами дисперсных композиций.

1. Взаимодействие между твердыми частицами в результате проявления химических связей, молекулярных сил притяжения (силы Ван-дер-Ваальса), электростатических и магнитных сил.

2. Образование твердых мостиков между частицами вследствие действия следующих факторов: химических реакций, диффузии молекул на участках контакта, плавления веществ в зонах контакта частиц, кристаллизация растворенных веществ.

3. Соединения за счет связующего (адгезионные и когезионные мостики связующего).

4. Механические связи зацепления между частицами.

Преимущественное проявление того или иного из указанных факторов или механизмов взаимодействия частиц сыпучих материалов зависит от их состава, свойств структуры, а также определяется пере-

стройкой и изменением структуры в процессах истечения из сосудов, движения в транспортных системах и компактирования при воздействии внешнего давления технологических машин и устройств.

Силы взаимодействия между твердыми частицами в общем случае делятся на меж- и внутричастичные силы связи химической природы, молекулярные, электростатические (кулоновские), магнитные.

Силы связи химической природы являются внутримолекулярными, они возникают внутри частиц и между кристаллами в поликристаллических агрегатах. Эти силы порождаются в результате электрического взаимодействия между атомами и могут быть ионными или ковалентными.

Характерной чертой внутримолекулярных сил является значительная энергия связи (количество энергии, выделяющейся при образовании данной связи между атомами), достигающая 10^2–10^3 Дж/моль и имеющая небольшой радиус эффективного действия, не превышающий десятых долей нанометров. Следовательно, эти силы являются близкодействующими; прочность связей близка к прочности кристаллических зерен.

В порошкообразных композициях силы химической связи практически не проявляют себя. На свежих твердых поверхностях могут быть не насыщенные химические связи (валентные силы), которые, однако, быстро нейтрализуются в результате адсорбции атомов и молекул из окружающей атмосферы. В связи с такой нейтрализацией и очень ограниченным интервалом действия этих сил ненасыщенные химические связи оказывают влияние на адгезию или агломерацию твердых частиц лишь в исключительных случаях.

Молекулярные, электрические и магнитные силы связи являются межмолекулярными (межчастичными). Прочность связей между отдельными частицами значительно меньше внутримолекулярных связей.

Молекулярные силы взаимодействия, возникающие между двумя частицами, могут быть значительными, когда поверхности частиц достаточно близки между собой. Однако они быстро убывают по мере увеличения расстояния между контактными участками. Необходимое условие развития таких связей заключается в тесном сближении поверхностей, вступающих в контакт. Вот почему у хорошо сыпучих тел эти связи вообще отсутствуют, и прочность таких материалов определяется главным образом силами механического сцепления.

Поскольку неровности на поверхности очень мелких частиц значительно меньше по абсолютной величине, чем неровности на поверхностях более крупных частиц, склонность к агломерации более мелких частиц намного выше как из-за их способности к более тесному сближению, так и ввиду их относительно высокой удельной площади поверхности. Поэтому и прочность спрессованных материалов тем выше, чем мельче частицы материала.

Об этом свидетельствуют приведенные на рис. 2.3 данные изменения прочности при сжатии прессовок из чешуированного тринитротолуола плотностью 1580 кг/м^3 в зависимости от среднего диаметра частиц [4].

Согласно Е.М. Лифшицу сила молекулярного притяжения между двумя твердыми частицами

$$F_{\text{пр}} = -\frac{a}{h^{m+1}},$$

где a, m – постоянные, зависящие от свойств материала частиц; $m = 3$ при $h \leqslant \lambda_c$ и $m = 4$ при $h > \lambda_c$ (здесь λ_c – спектральная характеристика атомов взаимодействующих частиц); h – расстояние между поверхностями частиц.

Нужно учитывать, что последнее выражение относится к взаимодействию двух отдельных частиц. В действительности благодаря взаимному влиянию множества частиц суммарная сила взаимодействия двух смежных частиц определяется более сложной зависимостью.

Энергия связи, создаваемая молекулярными силами межчастичного взаимодействия, значительно (часто на два порядка) меньше энергии связи, создаваемой внутримолекулярными силами. Расстояние, на котором сказывается действие молекулярных сил, значительно больше, чем у внутримолекулярных, и составляет от 0,5–1,0 нм до нескольких сотен нанометров.

При очень малых расстояниях (меньше 0,1 нм) притягивающие силы взаимодействия между соседними частицами становятся отталкивающими. Обусловлены они борновским взаимодействием между электронными оболочками. Сила отталкивания

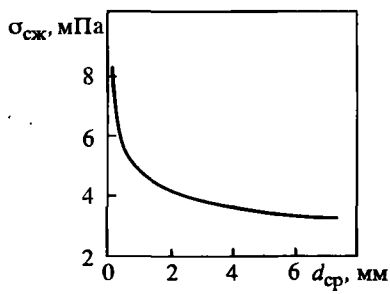


Рис. 2.3. Прочность прессовок из тринитротолуола на сжатие в зависимости от среднего диаметра частиц

$$F_{\text{от}} = \frac{b}{h^{n+1}},$$

где b, n – постоянные, зависящие от свойств материала частиц.

Результирующая этих двух сил

$$F_{\text{р}} = F_{\text{от}} + F_{\text{пр}} = \frac{b}{h^{n+1}} - \frac{a}{h^{m+1}}$$

при $n > m$.

Графически зависимость сил взаимодействия между частицами от расстояния между ними изображена на рис. 2.4. По оси абсцисс отложено

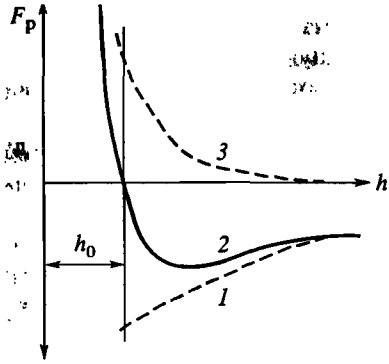


Рис. 2.4. Зависимость сил взаимодействия между частицами от расстояния между ними:
1 – сила притяжения; *2* – результирующая сила; *3* – сила отталкивания

расстояние между частицами, а по оси ординат – силы взаимодействия между ними; h_0 соответствует расстоянию, при котором равнодействующая сила равна нулю.

С учетом того, что $F_p = -dU/dh$, суммарная энергия взаимодействия двух частиц

$$U = A/h^m - B/h^n,$$

где $A = a/m$; $B = b/n$.

При $h = h_0$, когда $F_p = 0$, энергия взаимодействия между частицами имеет минимум.

Электростатические силы возникают в результате накопления на поверхности частиц электростатических зарядов. При разнозначных заряженных частицах они притягиваются, а при однозначных отталкиваются. Поскольку эти силы существенно зависят от полярности отдельных частиц и окружающих стенок, а также от конфигурации сближающихся поверхностей, точно оценить их влияние очень трудно. Для приближенных оценок можно использовать закон Кулона, описывающий силы, действующие между двумя электрическими зарядами. Энергия взаимодействия $U_{эл}$ и сила взаимодействия $F_{эл}$ соответственно:

$$U_{эл} = k(q_1q_2)/(\varepsilon h);\ F_{эл} = k(q_1q_2)/(\varepsilon h^2),$$

где k – коэффициент; $k = 1/(4\pi\varepsilon_0)$, здесь $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, окружающей частицы; h – расстояние между частицами; q_1, q_2 – заряды частиц.

Сила $F_{эл} > 0$ при одноименных зарядах; $F_{эл} < 0$ при разноименных зарядах.

Проведенные исследования электрофизических свойств некоторых взрывчатых материалов – чешуированного тротила, гексогена, чешуированного алюмотола, показали, что абсолютная диэлектрическая проницаемость твердых частиц указанных материалов составляет $\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0 = (4 \div 6) \cdot 10^{-5}$ мкФ/м. Это характерно для полярных диэлектриков и указывает на существование полярных мотивов в структурах исследованных веществ [4].

При изменении температуры на исследованных образцах появляется незначительный электрический заряд. Плотность заряда, возникающего при изменении температуры на 20 °С, составила от 10^{-8} до 10^{-6} Кл/м^2 [4].

Поскольку большинство кристаллических взрывчатых веществ являются диэлектриками, электростатические силы для этих и других веществ с явно выраженными диэлектрическими свойствами при уплотнении давлением, как правило, невелика.

Значимое воздействие статического электричества на сыпучие материалы с диэлектрическими свойствами имеется при их истечении из аппаратов, бункеров, а также движении в транспортных системах, особенно в устройствах пневматического транспорта по причине возможного самовозгорания и взрыва некоторых из них.

Магнитные силы могут возникать в тонкодисперсных системах наряду с рассмотренными силами. Их возникновение связано с наличием в дисперсных системах ферромагнетиков. В большинстве случаев сыпучие ПВВ не содержат в своем составе ферромагнитных веществ.

В заключение отметим, что рассмотренные здесь силы, возбуждая энергетические поля, формируют связи между частицами дисперсной системы. Прочность этих связей варьируется в больших пределах в зависимости от того, какой тип связи доминирует. При этом следует различать прочность одной связи (единичного контакта) и прочность дисперсного тела в целом.

Твердые мостики между частицами способствуют агломерированию отдельных частиц в монолитное пористое тело при хранении и обработке сыпучих материалов давлением.

Диффузионные твердые мостики между частицами образуются за счет молекулярной диффузии вещества из одной частицы в другую на участках их контакта. Скорость процесса определяется температурой, площадью контакта поверхностей и давлением в месте контакта. С увеличением температуры, площади контакта и давления скорость связывания возрастает.

Твердые мостики, образуемые посредством химических реакций, зависят от типов материалов, их химической активности. Повышение температуры и давления способствует иногда увеличению скорости роста и изменению структуры такого мостика. Химические реакции гигроскопичных веществ часто активизируются в присутствии влаги.

Плавление веществ на участках контакта – это явление, при котором между не полностью оплавленными частицами (поверхностное плавление может произойти, например, за счет тепла, выделяющегося при трении) образуются *жидкие мостики*. В случаях когда дополнительное тепло не подводится, эти мостики быстро затвердевают. Такой механизм определяет агломерацию частиц материала с относительно низкой температурой плавления.

Сыпучие материалы в ряде случаев содержат те или иные примеси. Примеси могут образовывать с основным веществом *эвтектики*, которые плавятся при температурах, значительно меньших, чем температура плавления чистого вещества. Частичное поверхностное плавление

таких эвтектик с последующим затвердеванием также может быть причиной образования твердых мостиков между частицами.

Твердые кристаллические мостики могут образовываться путем кристаллизации растворенных веществ. Если, например, аммиачная, натриевая или калиевая селитра содержат хотя бы небольшое количество влаги, то кристаллические мостики между отдельными частицами могут образовываться даже при хранении в воздухонепроницаемых мешках или контейнерах в случаях периодического изменения температуры. Повышение температуры вызывает дополнительное растворение соли, которая *рекристаллизуется* с образованием твердых мостиков между частицами при последующем понижении температуры.

Упрочнение структуры пористого тела за счет твердых мостиков, объединяющих отдельные частицы в общий монолит, получило в практике формования изделий из порошкообразных материалов название *спекание*.

Понятие спекания порошков включает явление образования твердых мостиков в результате суммарного действия химических и физических факторов. Температура вещества, при которой указанные факторы связи между частицами начинают проявлять себя, получила название *температура спекания* $T_{сп}$. Она может быть значительно ниже температуры плавления $T_{пл}$. Например, для металлических порошков $T_{сп} = (0,3 \div 0,4)T_{пл}$, для силикатов и органических веществ $T_{сп} = (0,3 \div 0,9)T_{пл}$.

Соединения за счет связующего характеризуются следующим. В зависимости от характера влияния связующего на твердый скелет сыпучего материала все связующие вещества можно разделить на три группы: вяжущие, пленкообразующие и химические.

При использовании *вяжущих веществ* (смолы, мастики и др.) прочность образовавшейся связи зависит от равномерного нанесения слоя на поверхность частиц, адгезионного взаимодействия смазочного материала с поверхностью частиц, состояния поверхности и формы частиц.

Пленкообразующие связующие вещества применяют обычно в виде растворов или суспензий. Эти связующие образуют адсорбционные слои на частицах. Тонкие адсорбционные слои вокруг частиц не могут двигаться свободно. Однако они могут приходить в соприкосновение или проникать один в другой более легко, чем чистые твердые частицы. Если толщина адсорбционных слоев составляет единицы нанометров, то можно ожидать, что возникающие при этом молекулярные силы полностью перекроят расстояние между частицами. Площадь контактирующей поверхности адсорбционных слоев может еще больше увеличиться, если на частицы действуют какие-либо внешние силы.

На границе раздела жидкой и газообразной компонент дисперсной среды действует капиллярное давление, которое обусловливает воз-

никновение *капиллярных сил*. Капиллярная сила определяется количеством жидкости в паровом объеме:

$$F_к = 2\pi r_ж \sigma_{пн},$$

где $r_ж$ – радиус пятна жидкого контакта; $\sigma_{пн}$ – поверхностное натяжение жидкости на поверхности твердой частицы.

Эффективность применения *химических связующих веществ* зависит от характера взаимодействия между компонентами связующего или между связующим и материалом твердых частиц. В зависимости от качества исходного материала и требований к готовому продукту химические связующие вещества могут быть вяжущими или пленкообразующего типа.

Выбор связующих веществ определяется свойствами сыпучего материала, условиями технологического процесса и типом используемого оборудования.

Механические связи между частицами возникают за счет того, что пластинчатые частицы, а также частицы неправильной формы имеют тенденцию зацепляться или переплетаться между собой. Прочность связей такого типа зависит непосредственно от прочности самих частиц и вида зацепления. При действии внешних сил на сыпучий материал эффект упрочнения структуры материала от сил зацепления увеличивается.

В заключение следует отметить, что для различных сыпучих материалов могут преобладать те или иные из указанных типов связей. В процессе компактирования сыпучего материала при действии внешнего давления проявления каждой группы связей может меняться. Те связи, которые не были характерны или вообще не проявлялись в исходном насыпном состоянии для данного материала, могут стать преобладающими в зависимости от условий проведения конкретного технологического процесса и деформирования первоначальной структуры.

Текстура сыпучих материалов. Напомним, что такие понятия, как размер, форма, характер поверхности, количественное соотношение слагающих дисперсную смесь элементов и характер их взаимной связи, определяют структуру сыпучих сред. Включение в понятие «структура» характера межчастичных связей вполне правомерно. Именно такое представление, а не узкое определение структуры как только особенностей взаиморасположения частиц, отвечает современным представлениям о физико-механической сущности таких чрезвычайно сложных материальных систем, как сыпучие материалы.

Текстуру сыпучего тела определяет пространственное положение слагающих его элементов, причем размер элементов не играет роли. Текстура может быть *упорядоченной*, характеризующейся определен-

ной ориентацией структурных элементов относительно какого-либо направления в пространстве, и *беспорядочной*, характеризующейся хаотическим расположением структурных элементов.

Среди упорядоченных текстур различают: осевые текстуры с предпочтительной ориентацией относительно одного направления (ось текстуры), плоские текстуры с ориентацией относительно плоскости (плоскость текстуры). Текстуры называются полными при наличии плоскости и выделенной оси текстуры. Возможно образование сложной текстуры с несколькими видами ориентаций.

В текстурах обычно не бывает ориентации всех элементов. Существует разброс ориентаций относительно выделенных осей и плоскостей.

Упорядоченные текстуры пористых тел могут образовываться при термомеханическом и термомагнитном воздействиях в процессах формирования изделий из сыпучих материалов, например, под действием давления, тепловых потоков, электрических и магнитных полей и др. При изучении текстуры наиболее часто используются рентгенографические и оптические методы.

Под действием внешней нагрузки на сыпучий материал происходит перестройка его структуры, заключающаяся в перекомпоновке частиц, их деформировании, образовании мостиков сцепления и в изменении их ориентации. Если в начале процесса деформирования частицы ориентированы хаотично или эта ориентация упорядочена, но не совпадает с направлением действия внешних сил, то в результате деформирования материала частицы стремятся принять упорядоченное положение, что отвечает минимуму внутренней энергии.

Такое изменение ориентации частиц происходит при любом виде деформирования (теоретически, кроме равномерного всестороннего сжатия). Направление ориентации зависит от вида напряженного состояния. Так, при сжатии без возможного бокового деформирования (прессование в замкнутой матрице) частицы главным образом ориентируются базисными плоскостями ортогонально направлению действия наибольшего нормального напряжения (направлению движения пуансона). Переориентация начинается даже при сравнительно небольших нагрузках, а с их возрастанием степень ее увеличивается. В этом случае в материале возникает *осевая текстура.*

При сдвиге частицы ориентируются по плоскостям, параллельно направлению сдвига; возникает *плоская текстура.*

При сжатии сыпучего материала с возможностью бокового деформирования (при прокатке, экструзии, послойном прессовании и т.п.) частицы вначале укладываются базисными плоскостями ортогонально действию сжимающей силы. Затем по мере возрастания нагрузки и развития деформаций сдвига частицы ориентируются в направлении действия максимальных касательных напряжений по возможным или

возникающим плоскостям и поверхностям скольжения. В этом случае возникает *полная текстура.*

В зависимости от способа уплотнения материала и характера действия внешних силовых факторов может преобладать та или иная ориентация частиц, определяемая напряженным состоянием рассматриваемого объема деформируемого тела.

2.3. Структура эмульсионных промышленных взрывчатых веществ [5–8]

Строение ЭВВ. *Эмульсия* – система, состоящая из двух несмешивающихся или только частично смешивающихся жидких фаз, одна из которых диспергирована в виде капель в другой. Раздробленная на капли жидкость составляет внутреннюю (дисперсную) фазу; жидкость, заполняющая пространство между капельками, образует внешнюю (дисперсионную) среду. Две жидкости М (масло) и В (вода) теоретически могут образовывать эмульсии двух типов: прямого – масло диспергировано в воде («масло в воде» – М/В); обратного – вода диспергирована в масле («вода в масле» – В/М).

Эмульсионные ВВ представляют собой обратные эмульсии типа «вода в масле», представляющие собой смесь двух жидкостей, практически не растворимых одна в другой [5–7].

Дисперсную фазу составляет *гидрофильная*, полярная жидкость, именуемая «водой», в виде капель (глобул) диаметром порядка 0,1–100 мкм.

Непрерывную фазу – иначе, дисперсионную среду, в таких эмульсиях составляет *гидрофобная*, неполярная жидкость, именуемая «маслом».

В качестве дисперсионной среды преимущественно используют водные растворы нитрата аммония (аммиачной селитры), а также его смеси с нитратами щелочных и щелочноземельных металлов. Иногда в состав водного раствора вводят инертные соли, такие как водорастворимые хлориды, играющие роль пламягасительных добавок.

Дисперсионную среду ЭВВ образуют преимущественно продукты переработки нефти, минеральные масла, воск, парафины в чистом виде или в виде их смесей. Количество углеводородного топлива в эмульсиях, как правило, соответствует нулевому кислородному балансу смеси, который достигается при массовой доле горючего 4–5% и редко превышает 6–8%.

Для ЭВВ характерно большое объемное содержание водного раствора окислителей 80–97%. Это превышает предельную упаковку сфер одинакового размера, когда их объемная доля составляет 74%. В результате капли эмульсии соприкасаются своими защитными оболоч-

ками и образуют связную (сплошную) структуру, которая приобретает «твердообразные» свойства – упругость формы. При еще более высоких концентрациях для достаточно устойчивой эмульсии глобулы, сдавливая друг друга, деформируются и превращаются в *полиэдрические ячейки*, разделенные пленками дисперсионной среды («маслом») толщиной порядка 10–20 нм для капель дисперсной фазы размером порядка 1 мкм [8].

С позиции термодинамики эмульсии являются неустойчивыми системами, одним из важнейших условий получения их *метастабильного состояния* является применение эмульгатора. С этой точки зрения выбор эмульгатора и оптимизация его доли в смеси являются одними из основных и сложных задач разработки ЭВВ.

В качестве эмульгаторов для стабилизации обратных эмульсий водных растворов солей-окислителей в углеводородах могут применяться: жирные кислоты и их соли; эфиры многоатомных спиртов и жирных кислот (глицерина, гликолей, пентаэритрита); оксиэтилированные эфиры многоатомных спиртов и сахаров с жирными кислотами; эфиры сахаров и жирных кислот; амины жирных кислот и их соли, имиды и алканоламины; производные оксазолина; производные имидазолина; сульфонаты; эфиры жирных кислот с алифатическими разветвленными спиртами; органические фосфаты и др. [5].

Изменяя природу эмульгатора и его концентрацию, можно добиться обращения фаз эмульсии. С увеличением концентрации эмульгатора в смеси поверхностное натяжение на границе раздела двух жидкостей уменьшается и процесс образования эмульсии происходит все легче, возрастает ее стабильность, а размер капель уменьшается. Возрастание концентрации эмульгатора выше оптимальной уже не улучшает стабильность эмульсии и не дает более мелких капель, так как поверхностное натяжение меняется незначительно. В процессе эмульгирования употребляют эмульгаторы в минимальных количествах, которые позволяют получать приемлемые для практических целей свойства образованных эмульсий.

Высококонцентрированные эмульсии могут быть получены и сохранены на определенное время только в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ) – эмульгаторов, назначение которых состоит в уменьшении межфазного поверхностного натяжения. Такие ПАВ могут стабилизировать эмульсии: во-первых, путем образования мономолекулярных адсорбционных слоев в виде пленки, препятствующей их коалесценсии; во-вторых, путем образования в непрерывной фазе вокруг капель высоковязких растворов, препятствующих сближению капель. К веществам, работающим по первому механизму, следует отнести жидкие мыла, эфиры непредельных кислот и пентаэритрита.

Высокомолекулярные ПАВ и эфиры предельных кислот работают в качестве эмульгаторов по второму механизму.

Очевидно, совместное применение ПАВ различных групп позволит получить большие объемы высокодисперсной эмульсии с высокой устойчивостью. В настоящее время ПАВ чаще всего применяют не как индивидуальные продукты, а в композициях. С одной стороны, это позволяет отказаться от дорогостоящих и дефицитных веществ, а с другой, усилить действие самих ПАВ. Такое взаимодействие компонентов принято называть *синергетическим*. Как правило, комбинации содержат высоко- и низкомолекулярные ПАВ.

Для стабилизации эмульсий типа «вода в масле» используют 1–10% по массе ПАВ [5]. Вероятность возникновения обратных эмульсий однозначно определяется типом эмульгатора, при этом решающее значение имеет *гидрофильно-липофильный баланс* (ГЛБ) – баланс между группами, обладающими химическим сродством к воде, и группами, обладающими сродством к маслу. Использование поверхностно-активных веществ с низким ГЛБ приводит к уменьшению силы поверхностного натяжения масла и образованию эмульсии типа «вода в масле».

Если число ГЛБ заключено в пределах 3–6, образуется эмульсия В/М; эмульгаторы с числом ГЛБ, равным 8–13, образуют эмульсии М/В [8].

Высокостойкие концентрированные эмульсии могут быть получены при образовании на поверхности всех капель эмульсии со стороны дисперсионной среды стабилизирующей оболочки, механически препятствующей *агрегированию* (объединению) и *коалесценции* (слиянию) капель. Это обеспечивается эмульгатором. На внешней поверхности капель должен образовываться *коллоидно-адсорбционный* слой эмульгатора с гелеобразной структурой. Эти адсорбционные слои, обладающие упругостью и механической прочностью, сопротивляются усилиям, разрушающим эмульсию.

Причиной стабилизации эмульсии может также являться и образование кристаллоподобных структур в водных растворах окислителя вблизи температуры плавления.

Обратные эмульсии, вследствие присутствия в их составе значительной доли воды (8–15%) имеют критические диаметры порядка 10^{-3}–10^{-1} м. Поэтому эмульсионные ВВ не находят практического применения без специальной обработки, именуемой *стабилизацией детонации*. Это могут быть мощные конденсированные ВВ, такие как тринитротолуол и ТЭН, нитроглицерин, нитрамины, растворимые в углеводородном горючем эфиры азотной кислоты и аминонитраты [5].

Другую группу составляют физические и химические способы введения в объем эмульсионных ВВ газонаполненных микрополостей, которые могут служить центрами возникновения химических реакций в детонационной волне.

Аэрация эмульсионных ВВ может осуществляться механическим перемешиванием или вдуванием воздуха, использованием вспенивающих агентов и содержащих воздух веществ, например, микросфер.

Механическая аэрация эмульсии, осуществляемая при перемешивании жидкости (*окклюдирование*), является достаточно тонким технологическим приемом и зависит от вязкости среды, температуры и других факторов.

Гораздо большее применение получила аэрация с использованием химических газогенерирующих веществ. Такие вещества в результате реакции с водой или при разложении под действием повышенной температуры выделяют газ, который в виде микропузырьков распределяется по всему объему эмульсии ВВ. Количество газообразующих веществ составляет 0,01–2,0% по массе. Наряду с доступными смесями нитрита натрия с водой, мочевиной, тиомочевиной для аэрации используют динитрозопентаметилентетрамин, азобисизобутиронитрил, боргидрилы щелочных металлов.

Аэрация физическим способом связана с сенсибилизацией эмульсии ВВ частицами газонаполненных материалов или специально изготовленными микросферами. Для этого в состав ВВ вводят 1–10% пористых частиц цеолита, перлита, порошка алюминия, золы, песка или микросфер. Микросферы изготовляют из неорганических материалов: стекла, окиси алюминия, кварца, вулканических пород, силикатов, буры, различных шлаков. В последнее время все шире используют микросферы из полистирола, фенолформальдегидных, поливинилиденхлоридных, эпоксидных смол, резины. Размер микросфер составляет 10–150 мкм при объемной плотности 50–150 кг/м^3. Наиболее часто применяют стеклянные и полистирольные микросферы [5].

Силы взаимодействия в эмульсиях. Известно, что в коллоидных системах в самом общем случае могут существовать две группы сил взаимодействия.

1. Дальнодействующие поверхностные силы:
   - ван-дер-ваальсовы силы притяжения между частицами;
   - силы электрического двойного слоя (отталкивания между поверхностями одинакового знака, притяжения для противоположных знаков).
2. Ближнедействующие поверхностные силы:
   - химические связи молекул с поверхностными группами посредством ионной, ковалентной и водородной связей;
   - физическая связь молекул посредством дипольного взаимодействия;
   - гидрофобная связь при ассоциации двух негидратированных частиц в водной среде;
   - борновские силы отталкивания между атомами.

В обратных эмульсиях серьезных доказательств существования двойного электрического слоя не имеется. На расстоянии большем порядка 1 нм глобулы эмульсии не притягиваются друг к другу ван-

дер-ваальсовыми силами [8]. Вопрос о силах притяжения и отталкивания капель обратных эмульсий можно считать открытым и требующим экспериментального и теоретического решений. При стабилизации эмульсий следует учитывать не только силы отталкивания-притяжения между каплями, но и адсорбционные явления, связанные с действием ПАВ, т.е. эмульгатора.

2.4. Структура гелеобразных промышленных взрывчатых веществ [9, 10]

К гелеобразным ПВВ относятся структурированные дисперсные системы, в которых в качестве сплошной или дисперсионной среды используют водный раствор нитрата аммония или в смеси с нитратом натрия и кальция. В качестве дисперсионной среды используют ВВ, подобное тротилу, и горючие высококалорийные металлы, например, алюминий. В ряде случаев в дисперсионную фазу вводят избыточный твердый окислитель [9, 10].

В составах этих ВВ водная дисперсионная среда загущается с помощью гидрофильного полимерного коллоида. В результате сцепления частиц дисперсной фазы образуется некоторый регулярный пространственный структурный каркас, что приводит к возникновению в системе структурной вязкости и ее отверждению. Подобное структурообразование жидких дисперсных систем (преимущественно разбавленных) часто называется *гелеобразованием.*

Гели – это студенистые тела, механические свойства которых в большей или меньшей степени подобны механическим свойствам твердых тел. Частицы дисперсной фазы соединены между собой в рыхлую пространственную сетку, которая содержит в своих ячейках дисперсионную среду, мешая текучести системы в целом. Такие структуры называются *коагуляционными* в отличие от *конденсационно-кристаллических* структур; последние образуются при возникновении между частицами фазовых контактов, прочность которых может достигать прочности самих частиц.

В коагуляционных структурах между частицами дисперсной фазы действуют ван-дер-ваальсовые силы, которые не превышают 10^{-8} Н; часто контакт осуществляется через тонкую прослойку дисперсионной среды. При механическом воздействии контакты обратимо разрушаются, вязкость системы уменьшается; при устранении воздействия структура восстанавливается.

Таким образом, гелеобразные структуры обладают тиксотропными свойствами. Гели с водной дисперсионной средой называются *гидрогелями*, с углеводородной – *органогелями.*

2.5. Структура полимерных композиционных промышленных взрывчатых веществ [11, 12]

Общие сведения. Композиционные материалы (композиты) представляют собой макроскопические гетерофазные системы, полученные из двух компонентов и более, обладающих различными химическими и физико-механическими свойствами. В большинстве случаев компоненты композиции различаются по геометрическому признаку. Один из компонентов может быть непрерывным по всему объему композиционного материала или в объеме, существенно превышающем объем минимально составляющих второго компонента. В этом случае непрерывный компонент называется *матрицей*, а дискретный компонент, разъединенный в объеме композиционного материала, *армирующим*. Смысл термина «армирующий» в расширенном понимании означает «введенный в материал с целью изменения его свойств», а не только «упрочняющий», как его обычно понимают. Деление композитов на матричные или армирующие не имеет смысла, если оба компонента равнозначны по геометрическому признаку.

В зависимости от вида армирующего компонента композиты могут быть разделены на две основные группы: *дисперсно-упрочненные* и *волокнистые*, которые отличаются внутренней структурой и механизмами сопротивления внешним нагрузкам.

Структура пластичных ВВ. Полимерные композиционные ПВВ или пластичные ВВ (как принято их называть в практической работе) относятся к дисперсно-упрочненным композитам. Они представляют собой полимерную матрицу, в объеме которой равномерно распределены мелкодисперсные частицы бризантного ВВ [11]. В таких материалах всю нагрузку воспринимает матрица, в которой с помощью не растворяющихся в ней твердых частиц второй фазы создается структура, сопротивляющаяся различного рода деформациям.

Деформационное поведение полимерной матрицы определяется природой полимера и свойствами его структуры.

По сравнению со структурой твердых дисперсных частиц кристаллических ВВ структура аморфных полимеров характеризуется ближним порядком в расположении звеньев и сегментов *макромолекул*, быстро исчезающих по мере их удаления друг от друга.

В различных синтезированных полимерах общая степень кристалличности колеблется от 10 до 90%. Поэтому аморфная часть может составлять половину и более общей массы полимера. Переход от кристаллической к аморфной части в полимере происходит не скачкообразно, а постепенно, через ряд промежуточных форм упорядоченности. Эти формы могут быть сравнительно высокоупорядоченными, почти как *кристаллит* (мелкий монокристалл, не имеющий ясно вы-

раженной огранки), с которым они соседствуют, либо практически совершенно не имеющими признаков дальнего порядка, подобно аморфным областям.

Ряд мономеров, содержащих высокополярные группы, в условиях обычной радикальной полимеризации, образуют стереорегулярные макромолекулы (например, поливинилхлорид, поливинилфторид, полиакрилонитрил и др.). Такие полимеры также являются частично кристаллическими и иногда называются *полукристаллическими.*

В *аморфных телах* атомы колеблются вокруг хаотически расположенных точек. Устойчивым состоянием (с минимальной внутренней энергией) твердых тел является кристаллическое состояние. Поэтому с термодинамической точки зрения аморфное тело находится в метастабильном состоянии. Это твердое состояние вещества характеризуется изотропией свойств и отсутствием точки плавления. Как известно, при повышении температуры аморфное вещество размягчается и переходит в жидкое состояние постепенно. Эти особенности обусловлены отсутствием у веществ в аморфном состоянии строгой периодичности, присущей кристаллам в расположении атомов, ионов, молекул и их групп на протяжении сотен и тысяч периодов. В то же время у веществ в аморфном состоянии существует согласованность в расположении соседних молекулярных частиц, т.е. в отличие от кристаллов существует только ближний порядок. Поэтому твердое тело в аморфном состоянии можно рассматривать как переохлажденную жидкость с очень высокой вязкостью (*стеклообразное состояние*).

Для повышения пластических и эластических свойств полимеров при переработке и эксплуатации часто производят их *пластификацию* за счет введения в них труднолетучих низкомолекулярных веществ, называемых *пластификаторами.* Пластификаторы понижают температуры хрупкости, стеклования и текучести; они уменьшают пределы текучести или вынужденной высокоэластичности вследствие уменьшения интенсивности взаимодействия между макромолекулами и облегчения подвижности их сегментов. В результате облегчается диспергирование ингредиентов (например, твердых частиц ВВ) в объем полимерной матрицы. Некоторые пластификаторы могут повышать огне-, свето- и термостойкость полимеров.

Пластификаторы должны обладать следующими свойствами: хорошей совместимостью с полимером, низкой летучестью, отсутствием запаха, химической инертностью, стойкостью к экстракции из полимера и др. Наибольшее распространение среди пластификаторов находят сложные эфиры, например, диоктилфталат, дибутилсербацинат, а также минеральные и невысыхающие растительные масла и др. Количество пластификатора в полимерных композициях может составлять от 1–2 до 100% (от массы полимера) [12].

2.6. Основные физико-механические свойства [4, 8, 14]

Жидкости и их смеси. В состав ПВВ могут входить как в виде отдельных компонентов, так и их смесей жидкости, эмульсии, суспензии, сыпучие компоненты. Используемые процессы и аппараты технологии ПВВ и методы их расчета во многом определяются физическими свойствами перерабатываемых материалов.

По химическому составу различают однокомпонентные (или чистые) жидкости и многокомпонентные жидкие смеси (растворы). По физической природе жидкости делятся на *нормальные* (обычные) жидкости, *жидкие кристаллы* с сильно выраженной анизотропией и *квантовые жидкости* (жидкие состояния гелия). В дальнейшем рассматриваются только нормальные жидкости (просто жидкости); они макроскопически однородны и изотропны при отсутствии внешнего воздействия.

К основным физическим свойствам жидкости обычно относят плотность ρ, поверхностное натяжение σ и вязкость μ.

Зависимость *плотности* от давления и температуры, а в случае растворов – и от концентрации компонентов, определяется *уравнением состояния*. Имеется большое число эмпирических, полуэмпирических и приближенных теоретических уравнений состояния для различных индивидуальных жидкостей и их смесей.

Поверхностное натяжение является термодинамической характеристикой поверхности раздела двух фаз, определяемой работой обратимого изотермического образования единицы площади этой поверхности. Оно измеряется в джоулях, деленных на квадратный метр (Дж/м^2), или в ньютонах, деленных на метр (Н/м).

Поверхностное натяжение на границе двух конденсированных фаз (например, между двумя несмешивающимися жидкостями) обычно называется *межфазным натяжением*. Работа образования новой поверхности затрачивается на преодоление сил межмолекулярного сцепления (*когезии*) при переходе молекул вещества из объема тела в поверхностный слой.

Поверхностное натяжение уменьшается при повышении температуры и под воздействием поверхностно-активных веществ и не зависит от размера и формы поверхности, если объемы фаз достаточно велики по сравнению с размерами молекул. Влияние поверхностного натяжения весьма существенно в процессах диспергирования жидкостей (см. подразд. 6.3).

На характер механического движения жидкости как сплошной среды существенное влияние оказывает ее *вязкость* или *внутреннее трение*.

Впервые на наличие внутреннего трения между частицами жидкости было указано И. Ньютоном (1687 г.) в книге «Математические на-

чала натуральной философии». В ней Ньютон высказал гипотезу, согласно которой сила внутреннего трения между частицами жидкости пропорциональна относительной скорости этих частиц.

В наше время эта гипотеза при ламинарном изотермическом течении жидкости представлена в виде формулы

$$\tau = \mu \frac{dv}{dx}, \qquad (2.4)$$

где τ – касательное напряжение сдвига слоев жидкости один относительно другого; μ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом *динамической вязкости* или просто вязкость, Н·с/м^2 или Па·с; dv/dx – градиент скорости сдвига, характеризующий изменение скорости на единице расстояния по нормали к вектору скорости.

Наряду с динамической часто рассматривают так называемую *кинематическую вязкость* $\nu = \mu/\rho$, измеряемую в метрах в квадрате, деленных на секунду.

Вязкость μ в значительной мере зависит от температуры и в меньшей – от давления. В условиях ламинарного течения, когда *число Рейнольдса* $\mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{крит}$, вязкость является физической постоянной, определяемой молекулярной природой жидкости и ее состоянием (ее температурой и давлением). Вязкие жидкости, подчиняющиеся закону течения по формуле (2.4), в *реологии* – науке о деформациях и текучести вещества получили название *ньютоновских жидкостей.*

В отличие от ньютоновских жидкостей у *неньютоновских* (структурно-вязких) *жидкостей* вязкость зависит от режима течения даже при малых числах Re. В зависимости от вида функциональной связи вязкости с напряжением сдвига или градиентом скорости сдвига неньютоновские жидкости можно условно разделить на следующие группы: вязкопластичные системы (бингамовские жидкости или тело Шведова–Бингама)[1], псевдопластичные жидкости (псевдопластики), дилатантные, реопектические, тиксотропные и вязкоупругие жидкости.

К *вязкопластичным системам* относятся жидкости, имеющие начальный предел текучести τ_0, ниже которого они не текут, и представляющие из себя твердое деформируемое тело. Изменение их вязкости подчиняется закону течения по формуле (2.4) при напряжении сдвига $\tau > \tau_0$:

[1] Часто типовым реологическим моделям присваиваются имена выдающихся ученых, внесших большой вклад в науку о деформациях и течении веществ.

$$\tau = \tau_0 + \mu_п \frac{dv}{dx}, \qquad (2.5)$$

где $\mu_п$ – пластическая вязкость.

Реологические свойства многих концентрированных суспензий соответствуют уравнению течения (2.5).

Для описания реологических свойств течения *псевдопластичных жидкостей* наиболее часто используют так называемый «степенной закон течения»:

$$\tau = m\left(\frac{dv}{dx}\right)^{n-1}\frac{dv}{dx}, \qquad (2.6)$$

где m – коэффициент консистенции; n – индекс течения.

Показатели m и n являются реологическими константами жидкости, которые определяются экспериментально. Вязкость псевдопластиков имеет смысл отношения $\mu_{каж} = \frac{\tau}{dv/dx}$. С учетом уравнения (2.6) его можно записать в виде

$$\mu_{каж} = m\left(\frac{dv}{dx}\right)^{n-1}. \qquad (2.7)$$

Вязкость $\mu_{каж}$ называют *кажущейся вязкостью*. При увеличении скорости сдвига псевдопластичных жидкостей $\mu_{каж}$ уменьшается, поэтому им в уравнениях (2.6) и (2.7) соответствует $n < 1$.

К псевдопластикам относятся многие полимерные материалы и некоторые концентрированные эмульсии.

Дилатантные жидкости подчиняются закону (2.6), но для них $n > 1$; их кажущаяся вязкость возрастает при увеличении скорости сдвига.

Не трудно видеть, что при $n = 1$ и $m = \mu$ уравнение (2.6) трансформируется в выражение (2.4), отражающее реологический закон течения ньютоновской жидкости.

Входящие в уравнения (2.4)–(2.6) реологические параметры (μ, τ_0, $\mu_п$, m, n) определяются из опытных данных изменения напряжения сдвига в зависимости от градиента скорости сдвига, которые получили название *реологические кривые течения* (рис. 2.5). Для экспериментального определения реологических кривых течения используются специальные приборы – *вискозиметры* (реометры), например, ротационного или капиллярного типа [14].

Реологические свойства рассмотренных жидкостей не зависят от времени. Однако есть группа *тиксотропных* и *реопектических жидкостей*, у которых кажущаяся вязкость изменяется со временем при действии постоянного напряжения сдвига. Кажущаяся вязкость реопектических жидкостей увеличивается со временем, а тиксотропных – уменьшается при условии постоянства напряжения или скорости сдвига. Подобные свойства этих жидкостей связаны с разрушением их первоначальной структуры и ее восстановлением.

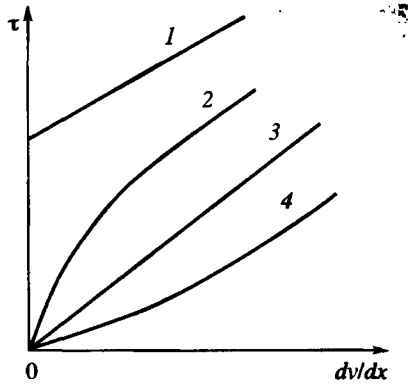


Рис. 2.5. Реологические кривые течения жидкостей:
1 – бингамовской; *2* – псевдопластичной; *3* – ньютоновской; *4* – дилатантной

В начальный момент сдвига в тиксотропных жидкостях происходит разрушение их структуры (структуры построения частиц или молекул), что вызывает уменьшение $\mu_{каж}$. Затем скорость процесса разрушения структуры становится равной скорости процесса структурообразования. С этого момента кажущаяся вязкость не изменяется. Для реопектических жидкостей повышение вязкости в начальный момент сдвига является следствием процесса структурообразования, который затем уравновешивается процессом разрушения образующейся структуры, что также приводит к постоянству значений кажущейся вязкости.

Реологические кривые реопектических и тиксотропных жидкостей в начальные моменты сдвига получают на вискозиметрах специальной конструкции. В остальные периоды реологические свойства описываются соответствующими уравнениями для псевдопластиков и вязкопластичных сред.

Вязкоупругие жидкости проявляют упругие свойства, присущие твердым телам, и свойства необратимого течения, характерные для жидкостей. Реологическое уравнение вязкоупругих сред содержит, как минимум, два параметра, один из которых характеризует их упругое поведение, а другой – вязкое.

Реологическое уравнение *максвелловской жидкости* выводится в предположении, что при простом сдвиге общая деформация γ в некоторой точке среды, где действует напряжение τ, представляет собой сумму упругой деформации $\gamma_{уп}$ и деформации течения $\gamma_т$. Следовательно,

$$\gamma = \gamma_{уп} + \gamma_т.$$

Это уравнение при дифференцировании по времени примет вид

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{уп} + \dot{\gamma}_{т}. \qquad (2.8)$$

Упругая деформация максвелловской жидкости описывается законом Гука ($\tau = G\gamma_{уп}$, где G – модуль сдвига), а вязкая – законом Ньютона по уравнению (2.4). В результате простых преобразований выражения (2.8) получим реологическое уравнение максвелловской жидкости:

$$\tau = \mu\frac{dv}{dx} - \left(\frac{\mu}{G}\right)\frac{d\tau}{dt}. \qquad (2.9)$$

В уравнении (2.9) отношение μ/G имеет размерность времени и называется *временем релаксации.*

Реологическое уравнение для *твердого тела Фойгта* выводится в предположении, что при простом сдвиге общее напряжение τ в некоторой точке среды, имеющей деформацию γ, определяется суммой напряжений, возникающих за счет упругости жидкости ($\tau_{уп}$) и вязкости жидкости ($\tau_{т}$). Следовательно,

$$\tau = \tau_{уп} + \tau_{т},$$

и так как упругое напряжение определяется законом Гука, а вязкое – законом Ньютона, реологическое уравнение для твердого тела Фойгта примет вид

$$\tau = \mu\frac{dv}{dx} + G\gamma. \qquad (2.10)$$

Дополнительные сведения о реологии и измерении реологических характеристик материалов можно найти в работах [4, 14].

Вязкость смеси взаиморастворимых ньютоновских жидкостей можно рассчитать по уравнению

$$\mu_c = \mu_1(1 - a_2) + \mu_2 a_2, \qquad (2.11)$$

где μ_c, μ_1, μ_2 – вязкость соответственно смеси, 1-й и 2-й жидкостей; a_2 – содержание второй жидкости по объему в общем объеме смеси.

Для смесей из неньютоновских жидкостей уравнение (2.11) не применимо. Для них необходимо экспериментально определять вязкость при каждом значении a_2.

Эмульсии. По реологическим свойствам эмульсии могут быть как ньютоновскими, так и неньютоновскими жидкостями. Плотность и вязкость эмульсий зависит от их состава. Если плотности компонентов эмульсии различаются не более чем на 30%, то плотность эмульсии принимают равной плотности сплошной среды; в остальных случаях средняя плотность эмульсии

$$\rho_э = \rho_д a_д + \rho_с(1 - a_д), \tag{2.12}$$

где $\rho_д$, $\rho_с$ – плотности соответственно дисперсной фазы и сплошной (дисперсионной) среды; $a_д$ – объемная доля дисперсной фазы в эмульсии.

При эмульгировании вне зависимости от вязкости компонентов и при $a_д \leqslant 0{,}3$ вязкость эмульсии принимают равной вязкости сплошной среды. При других условиях ($a_д > 0{,}3$) вязкость $\mu_э$ эмульсии подсчитывают по следующим уравнениям.

Если вязкость $\mu_д$ дисперсной фазы больше вязкости $\mu_с$ сплошной среды, то

$$\mu_э = \frac{\mu_с}{1 - a_д}\left(1 + \frac{6 a_д \mu_д}{\mu_с + \mu_д}\right). \tag{2.13}$$

Если вязкость $\mu_д$ дисперсной фазы меньше вязкости $\mu_с$ сплошной среды, то

$$\mu_э = \frac{\mu_с}{1 - a_д}\left(1 - \frac{1{,}5 a_д \mu_д}{\mu_с + \mu_д}\right). \tag{2.14}$$

При концентрации дисперсной фазы более 74% по объему вязкость эмульсий резко возрастает. Эмульсия приобретает свойства желе. Содержание дисперсной фазы можно довести до 95–96% и выше по объему; при этом сплошная среда сохраняется лишь в виде тонких пленок, обволакивающих деформированные капли.

Более подробно со свойствами эмульсий можно ознакомиться в работе [8].

Суспензии. Эти дисперсные системы получают диспергированием твердых тел в жидкостях, смешиванием сыпучих материалов с жидкостями, укрупнением коллоидных систем в результате коагуляции частиц или их конденсационного роста.

Суспензии относятся к дисперсным системам, средний размер частиц в которых обычно составляет не менее 1 мкм. В связи с этим суспензии термодинамически неустойчивы; частицы в них под действием

сил тяжести или центробежных сил осаждаются или разделяются. В концентрированных суспензиях осаждаются не отдельные частицы, а целые колонии слипшихся частиц, которые, смыкаясь одна с другой, образуют пространственную сетку. В результате осадок получается рыхлым, легко взмучиваемым.

Явление фиксации пространственного положения частиц вследствие возникновения контактных связей между ними получило название «структурообразования дисперсных систем». Суспензии, в которых появились пространственные цепочки из частиц, называются *структурированными*. Структурирование радикально изменяет реологические свойства суспензий. Как правило, структурированные суспензии обладают свойствами неньютоновских жидкостей. При перемешивании структурированная суспензия может превращаться в неструктурированную, т.е. состоящую из отдельных несвязанных одна с другой частиц. Обратимое изотермическое разрушение и восстановление связей между частицами получило название *тиксотропии*, а сами дисперсные системы с такими свойствами – тиксотропными.

Структурированное состояние является характерным для подавляющего числа технических суспензий.

Для оценки вязкости μ суспензий ($a_д < 0{,}1$), в которых сплошная сетка не образуется, можно воспользоваться формулой А. Эйнштейна (1911 г.) для вязкости разбавленных суспензий сферических частиц

$$\mu = \mu_c(1 + 2{,}5\, a_д). \qquad (2.15)$$

Для определения реологических свойств структурированных суспензий при установившемся течении можно воспользоваться моделью вязкопластичных сред (бингамовской жидкостью) в виде $\tau = \tau_{пс} + \mu_{каж}(dv/dx)$. Здесь $\tau_{пс}$ – предельное напряжение сдвига, приводящее к разрушению структурированной системы; $\mu_{каж}$ – кажущаяся вязкость, тождественная пластической вязкости в уравнении (2.5).

При $\tau \leqslant \tau_{пс}$ структурированная суспензия медленно течет, подобное течение можно отождествлять с явлением ползучести. Это означает, что $\tau_{пс}$ является не статическим (как τ_0 в реологическом законе Шведова–Бингама), а динамическим предельным напряжением сдвига. При $\tau > \tau_{пс}$ структура начинает разрушаться; ее разрушение усиливается с ростом относительной скорости сдвига (dv/dx). При этом вязкость $\mu_{каж}$ постоянна вплоть до такого значения dv/dx, при котором структура полностью разрушится. Для полностью разрушенной структуры, когда $\tau_{пс} = 0$, сопротивление сдвигу может резко уменьшиться до величины, равной $\mu_{каж}(dv/dx)$.

Плотность суспензий можно рассчитывать по формуле (2.12).

Твердые сыпучие среды. К физическим характеристикам сыпучих материалов обычно относят: плотность, форму кристаллов, распреде-

ление их по размерам, теплоемкость, теплопроводность, температуру плавления и др. Часть из них уже рассматривалась или будет рассматриваться в соответствующих разделах книги.

Из всего многообразия физических характеристик сыпучих материалов кратко остановимся на тех, которые имеют непосредственное отношение к механическим процессам их движения и компактирования давлением и обладают рядом свойств, обусловленных составом и структурой элементов этой твердой дисперсной системы.

Плотностью сыпучего материала ρ называют отношение массы $m = m_т + m_ж$ (здесь $m_т$, $m_ж$ – массы соответственно твердых частиц и жидкости в порах сыпучего материала; масса воздуха по незначительности не учитывается) к его объему $V = V_т + V_ж$ (здесь $V_т$, $V_ж$ – объемы соответственно твердых частиц и пор), т.е.

$$\rho = (m_т + m_ж)/(V_т + V_ж).$$

Плотность сыпучего материала в состоянии свободной засыпки называют *гравиметрической* или *насыпной плотностью* $\rho_н$. Значения $\rho_н$ для порошкообразных химических продуктов и металлических порошков нормированы.

Насыпная плотность не является абсолютной характеристикой. Ее значение колеблется не только в зависимости от гранулометрического состава, формы частиц, состояния их поверхности, но и от склонности частиц к агломерированию. Кроме того, насыпная плотность сыпучего материала зависит и от толщины слоя. Эта характеристика имеет значение при хранении, транспортировании и дозировании сыпучих материалов, а также учитывается в процессе дальнейшей переработки.

Насыпная плотность сыпучих компонентов ПВВ изменяется в широком диапазоне: от 200 до 1500–2000 кг/м^3.

Плотность твердой части сыпучих материалов $\rho_т$ определяется отношением массы твердых частиц к их объему:

$$\rho_т = m_т/V_т.$$

Для однокомпонентных составов $\rho_т$ совпадает с плотностью вещества твердой фазы. Для смесевых композиций $\rho_т$ можно вычислить, используя правило аддитивности, по следующему уравнению:

$$\rho_т = 100/(a_1/\rho_1 + a_2/\rho_2 + ... + a_n/\rho_n),$$

где a_1, a_2, ..., a_n – массовое процентное содержание каждого твердого компонента в смеси; ρ_1, ρ_2, ..., ρ_n – плотность соответствующего твердого компонента.

Порозностью слоя сыпучего материала ε называют отношение объема пор в слое к общему объему, занимаемому материалом в слое. Под *пористостью* $\varepsilon_п$ следует понимать долю пустот внутри объема пористого тела (например, внутри отдельных твердых частиц, спрессованного брикета, и т.п.).

Порозность и пористость обычно выражаются в следующем виде:

$$\varepsilon,\ \varepsilon_п = 1 - \rho/\rho_т.$$

Порозность ε зависит от способа укладки частиц, их формы, размера; пористость твердых тел зависит и от условий формирования структуры.

Для теоретической оценки порозности сыпучего материала часто используют глобулярную модель пористого тела. При этом условно полагают, что оно состоит из идеализированных сферических монодисперсных частиц, и вводят представление о так называемых *плотнейших шаровых упаковках* (ПШУ) или *плотных шаровых кладок* (ПШК) [13].

В первом типе упаковки каждый шар (сферическая частица) касается трех шаров соседнего слоя; в итоге каждая сферическая частица имеет координационное число 12. В плотных шаровых кладках шары располагаются менее компактно и имеют более низкие координационные числа.

Порозность сыпучего материала, состоящего из идеализированных сферических монодисперсных частиц (глобулярных систем), в зависимости от вида укладки представлена в табл. 2.1.

Порозность глобулярных систем с одинаковыми сферическими частицами зависит от типа упаковки и не зависит от размера частиц.

Использование бинарных систем за счет введения второй фракции сферических монодисперсных частиц меньшего диаметра в пустоты каркаса крупных частиц позволяет снизить порозность до 0,14 (теоретически возможное значение). При этом такая плотная укладка частиц

Таблица 2.1

Зависимость порозности от способа упаковки

Упаковка	Координационное число	Порозность
Кубическая:		
гранецентрированная	12	0,2595
объемноцентрированная	8	0,3198
простая	6	0,4764
Тетраэдрическая	4	0,6599

в бинарной системе может быть получена, когда соблюдается фильтрация мелких сферических частиц через каркас, образованный крупными шарами, т.е. диаметр мелких сфер $d_м \leqslant (2/\sqrt{3} - 1)\, d_к \cong 0{,}154\, d_к$ (здесь $d_к$ – диаметр крупных сфер).

Для глобулярной системы из трех фракционных компонент найдено соотношение диаметров сферических частиц, равное 77 : 7 : 1, и соотношение объемов компонент, равное 67 : 23 : 10, при которых система имеет теоретическую минимальную порозность укладки, равную 0,065.

Для систем из четырех фракционных компонент сферических частиц теоретическая минимальная порозность укладки составляет 0,029.

Получение высоких плотностей укладки сыпучих материалов (порозностью ниже 0,14) на практике крайне затруднено, так как размеры частиц каждой фракции должны отличаться между собой приблизительно на порядок, т.е. в четырехкомпонентной системе наибольшая частица должна быть крупнее наименьшей на 4–5 порядков. Кроме того, большинство используемых в промышленности порошков имеют частицы несферической формы.

Необходимо также учитывать, что для одного и того же материала порозность не является постоянной, а изменяется в зависимости от воздействия внешних факторов. Например, под действием вибрации она может изменяться для одного и того же сыпучего материала до 2–3 раз.

Коэффициент уплотнения $k_{уп}$ сыпучих материалов – это степень их уплотнения под действием сжимающих силовых факторов, которую оценивают соотношением между начальной, насыпной плотностью $\rho_н$ и плотностью сформированного пористого тела (прессовки) $\rho_п$:

$$k_{уп} = \rho_п / \rho_н.$$

Для большинства сыпучих материалов, перерабатываемых в изделия методом формования давлением, максимальное значение коэффициента $k_{уп}$ составляет 1,5–2,5.

Влажность сыпучего материала W – отношение массы воды $m_в$ к массе материала, высушенного до постоянной массы $m_т$, т.е. $W = 100\, m_в/m_т$. Такое определение влажности получило название *весовая* или *массовая влажность* (измеряется в процентах).

Под объемной влажностью W_V понимают отношение объема воды, заключенной в материале, к объему всего материала (измеряется в процентах).

Влажность сыпучих материалов – показатель переменный и может колебаться в широких пределах в зависимости от природы материала,

гранулометрического состава, температуры, атмосферного давления и др. Влажность является важной характеристикой состояния сыпучих материалов и учитывается при определении многих показателей свойств сыпучих материалов и пористых тел.

Тепловые свойства сыпучих материалов – это такие важные теплофизические характеристики сыпучих материалов, как теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность. Их необходимо знать при теплотехнических расчетах.

Теплоемкость сыпучих материалов характеризует способность материала поглощать тепло при теплообмене. Она зависит от природы компонентов сыпучего тела, его плотности и температуры. Различают объемную и удельную теплоемкости материала.

Теплоемкость единицы массы или *удельная массовая теплоемкость* c Дж/(кг·К) или Дж/(кг · °С), численно равна количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице массы вещества для изменения его температуры на 1 К или 1 °С.

Теплоемкость единицы объема или *удельная объемная теплоемкость* c_V Дж/(м·К) или Дж($м^3$ · °С), числено равна количеству энергии, необходимому для изменения температуры 1 $м^3$ вещества на 10 К или 1 °С.

Чаще всего прибегают к определению удельной массовой теплоемкости, так как она является более постоянной величиной.

Теплоемкость сыпучих сред как многофазных систем определяется в общем случае теплоемкостью их твердых, жидких и газообразных составляющих.

Теплоемкость твердой фазы взрывчатых материалов определяется кристаллическими элементами и содержанием органических веществ.

Удельная массовая теплоемкость у большинства порошкообразных взрывчатых материалов в состоянии насыпной плотности при 20 °С составляет 0,96–1,70 Дж/(кг·°С).

Для характеристики скорости передачи тепловой энергии принято пользоваться двумя показателями: теплопроводностью (коэффициентом теплопроводности) и температуропроводностью (коэффициентом температуропроводности).

Теплопроводность λ характеризует способность материала проводить тепло и представляет собой величину, равную количеству теплоты, переносимому в единицу времени через единицу площади при температурном градиенте 1 К/м или 1 °С/м, т.е. Вт/(м·К) или Вт/(м·°С).

Для большинства порошкообразных взрывчатых веществ в насыпном состоянии при температуре 20...40 °С теплопроводность составляет порядка 0,093 ÷ 0,72 Вт/(м·°С) [4].

Так, теплопроводность гексогена составляет 0,093 Вт/(м·°С), а у состава А-IX-2, содержащего 80% флегматизированного гексогена и 20% алюминия, теплопроводность равна 0,720 Вт/(м·°С), т.е. больше почти на один порядок. Это связано с присутствием в составе алюминиевого

порошка, который обладает значительно большей теплопроводностью (примерно в 20–30 раз) по сравнению с гексогеном.

Теплопроводность порошкообразных и пористых тел сильно зависит от их плотности. Например, при возрастании плотности от 800 до 1760 кг/м^3 теплопроводность состава А-IX-2 увеличивается от 0,720 до 1,160 Вт/(м·°С). Такое влияние плотности на теплопроводность объясняется тем, что с уменьшением плотности порошкообразных тел возрастает их пористость. Частицы менее плотно прилегают друг к другу, а теплопроводность заполняющего поры воздуха значительно меньше, чем твердых компонентов пористого тела.

Увеличение теплопроводности порошкообразных материалов с повышением температуры можно объяснить тем, что при этом возрастает теплопроводность среды, заполняющей промежутки (поры) между твердыми частицами, а также увеличивается теплопередача излучением зернистого массива.

Температуропроводность a (м^2/с) характеризует скорость распространения температуры вследствие поглощения или отдачи тепла

$$a = \lambda/(c\rho).$$

Температуропроводность зависит от природы сыпучей среды, плотности и температуры.

Механические свойства сыпучих материалов характеризуются следующим. В отличие от жидкостей сыпучие материалы в состоянии выдерживать определенные усилия сдвига. Деформации в них в виде скольжения одного слоя частиц по поверхности другого не наступает до тех пор, пока не достигнуто некоторое соотношение между сопротивлением сдвига и нормальным давлением в данной площадке сдвига

$$\tau_n = f\sigma_n + k, \qquad (2.16)$$

где τ_n, σ_n – соответственно касательная и нормальная составляющие вектора напряжений, действующих на площадке сдвига с нормалью n; f – коэффициент внутреннего трения; k – прочность сцепления между частицами (межчастичное сцепление).

Касательное напряжение в выражении (2.16) обычно называют *предельным сопротивлением сдвигу* или *пределом текучести* сыпучего материала.

При $k = 0$ уравнение (2.16) характеризует свойства *идеальной сыпучей среды*; при $f = 0$ – *идеального пластического тела* или *идеальносвязной среды*.

Если для конкретного сыпучего материала при определенном уплотняющем давлении p получено экспериментально несколько пар

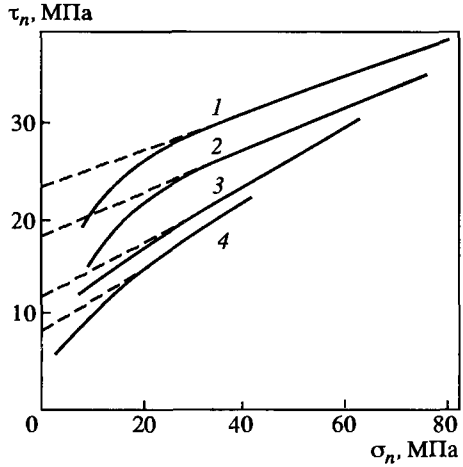


Рис. 2.6. Зависимость предельного напряжения сдвига от нормального напряжения тринитротолуола при различной плотности, кг/м^3:
1 = 1620; *2* – 1590; *3* – 1570; *4* – 1520

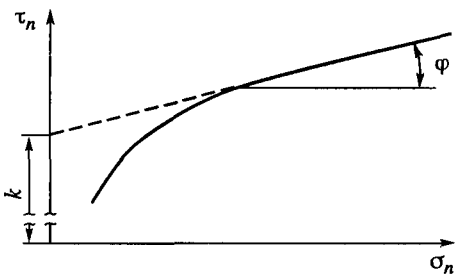


Рис. 2.7. Определение параметров предельного состояния (k, φ)

значений τ_n и σ_n ($\sigma_n \leqslant p$), то можно построить графическую зависимость предельного сопротивления τ_n сдвигу от нормального напряжения σ_n в плоскости скольжения (рис. 2.6). Под влиянием сжимающего давления плотность упаковки сыпучего материала увеличивается; это приводит к увеличению его прочности на разрыв и сопротивления деформациям. По этой причине для таких материалов графическая зависимость τ_n–σ_n выражается семейством линий, каждая из которых соответствует определенному уплотняющему давлению или плотности материала. С увеличением плотности материала линия $\tau_n(\sigma_n)$ смещается вверх. Как видно из рис. 2.6 (см. штриховые линии), зависимости $\tau n(\sigma_n)$ представляют в общем нелинейные кривые. Вместе с тем график предельного состояния (рис. 2.7) имеет значительную кривизну лишь на относительно малом начальном участке изменения нормального напряжения, а затем при возрастании нормального напряжения кривизна уменьшается, и график асимптотически приближается к прямой линии, соответствующей данной плотности материала. Угол φ наклона таких прямых называют *углом внутреннего трения*, который связан с коэффициентом внутреннего трения как $f = \operatorname{tg}\varphi$. Отрезок k, отсекаемый на оси τ_n называют *межчастичным сцеплением.*

Коэффициент внутреннего трения f является среднестатистическим значением коэффициентов трения частиц одна о другую и в общем случае зависят от плотности, размера и формы частиц, состояния их поверхности, влажности, температуры и т.п. С ростом плотности

наблюдаются заметное увеличение параметра межчастичного сцепления k и падение коэффициента внутреннего трения f. Все это подтверждает, что параметры предельного состояния имеют физический смысл, а характер изменения их величины согласуется с имеющимися представлениями о свойствах материалов. Так, свободно насыпанный порошок не обладает связностью ($k = 0$), а у многих монолитных тел сопротивление сдвигу почти не зависит от значения нормальных напряжений к площадке сдвига ($\varphi = 0$).

С изменением плотности сыпучих материалов более существенно меняется параметр межчастичного сцепления k, в то время как значение коэффициента внутреннего трения f меняется в меньшей степени. Для различных порошкообразных материалов параметр k обычно аппроксимируют линейной зависимостью

$$k = k_0 + k_1\sigma_{ср}, \tag{2.17}$$

где k_0 – когезионное сцепление между частицами сыпучего тела в свободном состоянии (до начала процесса уплотнения, когда $p = 0$); k_1 – коэффициент *аутогезии*, характеризующий возрастание прочности связей между частицами в процессе уплотнения; $\sigma_{ср} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – среднее нормальное напряжение (здесь $\sigma_1 \geqslant \sigma_2 \geqslant \sigma_3$ – главные напряжения).

Для порошкообразных материалов без проявления эффекта межчастичного сцепления в неуплотненном состоянии обычно $k_0 = 0$.

Коэффициент внутреннего трения f и межчастичное сцепление k для данного конкретного сыпучего материала уменьшаются с ростом температуры. Особенно это заметно при приближении температуры к температуре плавления кристаллических веществ или температуры размягчения аморфных веществ.

Коэффициент бокового давления выводится следующим образом. Условие предельного равновесия для плоского напряженного состояния (рис. 2.8, *а*) можно представить как

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2k\,\mathrm{ctg}\varphi)\sin\varphi. \tag{2.18}$$

Проведя линеаризацию уравнения (2.18) относительно касательных напряжений, полагая $\sigma_1 = \sigma_x$, $\sigma_2 = \sigma_y$, $\sigma_3 = \sigma_z \equiv 0$, из совместного его решения с выражением (2.17) получим

$$\sigma_y = \xi\sigma_x, \tag{2.19}$$

где ξ – коэффициент бокового давления; $\xi = \dfrac{3 - 3\sin\varphi - 2k_1\cos\varphi}{3 + 3\sin\varphi + 2k_1\cos\varphi}$.

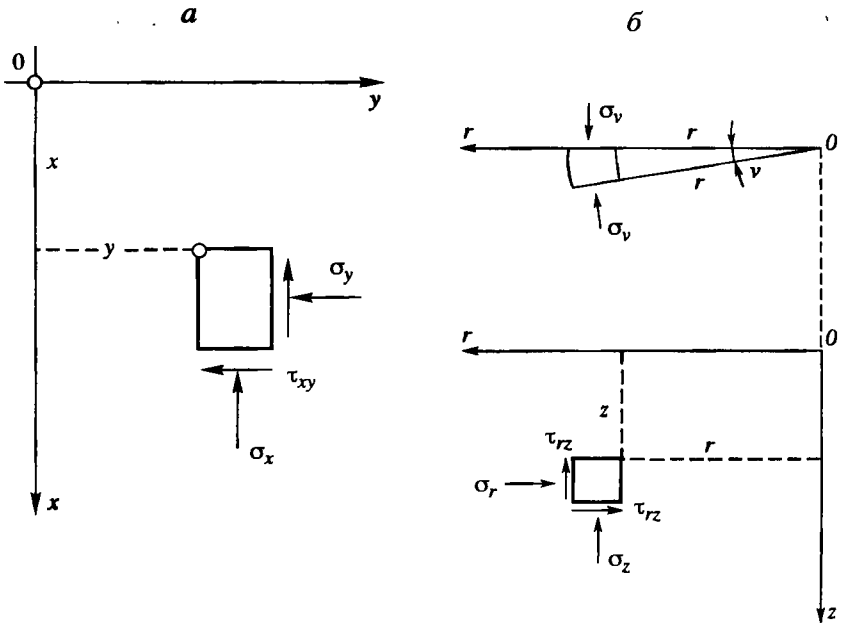


Рис. 2.8. Напряженные состояния элементарного макрообъема для плоской деформации (*а*) и осесимметричной задачи (*б*)

Для осесимметричной задачи (рис. 2.8, *б*) при деформации от оси симметрии, когда $\sigma_1 = \sigma_z$, $\sigma_2 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_r$, имеется следующее соотношение между нормальными напряжениями:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \xi\sigma_z \qquad (2.20)$$

при $\xi = \dfrac{3 - 3\sin\varphi - 2k_1\cos\varphi}{3 + 3\sin\varphi + 4k_1\cos\varphi}$.

При деформации к оси симметрии, когда $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_2 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_z$, имеется следующее соотношение между нормальными напряжениями:

$$\sigma_z = \sigma_\theta = \xi\sigma_r \qquad (2.21)$$

Коэффициент бокового давления для сыпучих материалов не является постоянным параметром. Многочисленные исследования свидетельствуют, что коэффициент бокового давления зависит от межчастичного контактного трения и увеличивается с ростом плотности ма-

териала. Возможный интервал его изменения составляет $0 < \xi < 1$. В интервале давления сжатия $p = (0 \div 400)$ МПа для металлических порошков $\xi = 0{,}38 \div 0{,}41$; для бризантных взрывчатых веществ $\xi = 0{,}15 \div 0{,}75$ (при давлении сжатия 10–200 МПа). Проведенные исследования влияния температуры на коэффициент бокового давления при компактировании давлением ряда взрывчатых веществ с относительно низкой температурой плавления (тротил, алюмотол, аммотол) показали, что для одной и той же плотности материала с увеличением температуры значение коэффициента бокового давления увеличивается и при температуре, близкой к температуре плавления, его значение приближается к единице.

Модуль объемного сжатия $E_{сж}$ рассчитывается по результатам испытаний сыпучего материала на приборах одноосного сжатия давлением p по формуле:

$$E_{сж} = \frac{\sigma_{ср}}{\varepsilon_V} = p\frac{1+2\xi}{3\varepsilon_V}, \qquad (2.22)$$

где ε_V – относительная объемная деформация; $\varepsilon_v = \Delta h/h_0$ (здесь Δh – изменение высоты слоя сыпучего материала при сжатии, h_0 – начальная высота слоя).

Модуль объемного сжатия $E_{сж}$ увеличивается с ростом плотности материала при компактировании (сжатии) давлением. В интервале изменения давления сжатия 10–150 МПа модуль $E_{сж}$ порошка хлорида калия увеличивается от $3 \cdot 10^8$ до $1{,}2 \cdot 10^9$ Н/м^2.

Дополнительные сведения о физико-механических свойствах твердых дисперсных сред можно найти в учебном пособии [4].

Литература

1. *Бацанов С.С.* Структурная химия. – М.: Диалог – МГУ, 2000. – 292 с.
2. *Горст А.Г.* Пороха и взрывчатые вещества. – М.: Машиностроение, 1972. – 207 с.
3. *Муштаев В.И., Ульянов В.М.* Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
4. *Генералов М.Б.* Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: Учеб. пособие для вузов. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – 592 с.
5. *Адамец Ю.Д., Петрищев Е.В.* Водосодержащие взрывчатые вещества на основе обратных эмульсий: Обзор технической и патентной литературы. – Раменское, (Моск. обл.): ВНИПКИВГР, НПО «Союзпромгеофизика», 1989. – 24 с.
6. *Гальперин В.Г., Юхимов Я.И.* Совершенствование промышленных ВВ // Безопасность труда в промышленности. 1986. № 10. С. 57–60.
7. *Жученко Е.И., Иоффе В.Б., Кукиб Б.Н.* и др. Эмульсионные взрывчатые вещества: Сб. науч. трудов / РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М., 2000. С. 339–349.
8. *Шнайдер Ф.* Эмульсии. – Л.: Химия, 1972. – 447 с.

9. *Кук М.А.* Наука о промышленных взрывчатых веществах. – М.: Недра, 1980. – 453 с.

10. *Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И.* Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1973. – 320 с.

11. *Пузырев Н.Г.* Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период. – СПб.: Гуманистик, 2001. – 928 с.

12. Большой энциклопедический словарь: Химия. (Гл. ред. *Кнунянц И.Л.*). – М.: БРЭ. 1998. – 791 с.

13. Большая Российская энциклопедия: Физика. (Гл. ред. *Прохоров А.М.*). – М.: БРЭ. 1998. – 943 с.

14. *Белкин И.М., Виноградов Г.В., Леонов А.И.* Ротационные приборы: Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.

ГЛАВА 3

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

3.1. Технология сыпучих аммиачно-селитренных промышленных взрывчатых веществ [1–5, 11]

Основные фазы технологии производства ПВВ. Проведенное знакомство с промышленными взрывчатыми веществами показало, как много различных их видов используется для взрывных работ в народном хозяйстве. Промышленные ВВ отличаются по составу, физическому состоянию и назначению. Вместе с тем в производстве ПВВ существует общая последовательность технологических операций. В подавляющем большинстве случаев технологию производства ПВВ можно разделить на следующие фазы:

- подготовка основных компонентов и вспомогательных материалов;
- смешение компонентов – собственно изготовление ПВВ;
- снаряжение зарядов и упаковка;
- складирование и хранение сырья, материалов и готовой продукции.

Каждая из перечисленных фаз производства включает целый ряд операций, связанных с выполнением разнообразных технологических процессов. Кроме того, в процессе производства выполняются вспомогательные операции, связанные с контролем, транспортированием сырья, полуфабрикатов и готовой продукции, изготовлением патронов, оболочек и др.

Хотя по своему существу технология производства ПВВ имеет много общего с химической технологией, тем не менее, производство ПВВ имеет и некоторые отличия от классических химических производств. Важнейшей отличительной особенностью производства ВВ является его взрывоопасность.

Соблюдение мер безопасности является одним из решающих факторов при выборе способа осуществления той или иной производственной операции, типа и конструкции технологического оборудования, транспорта материальных потоков, систем энерго- и водоснабжения, конструкций производственных зданий и безопасного взаимного

расположения в них аппаратов, машин и агрегатов, а также систем автоматизированного контроля и управления.

В зависимости от состава и назначения ПВВ в типовых процессах их получения и переработки могут быть некоторые отклонения в практическом оформлении отдельных операций и последовательности их выполнения.

Наиболее часто такие отклонения оказываются необходимыми при смешении компонентов, гранулировании, формовании заряда и укупорке.

В дальнейшем будут рассматриваться только типовые технологии, связанные с первыми тремя фазами производства ПВВ. Отметим лишь, что фаза складирования включает операции по приему сырья, материалов и готовой продукции, контролю соответствия их качественных показателей паспортным данным, обеспечению сохранности, как в процессе хранения, так и подачи в производственный цикл.

К основным фазам технологии сыпучих ПВВ относятся (рис. 3.1): подготовка твердых дисперсных компонентов (измельчение, классификация, сушка); приготовление взрывчатых смесей (смешивание); формование зарядов (кристаллизация из расплавов, прессование, шнекование, виброуплотнение и др.).

Подготовка компонентов. В качестве примера рассмотрим подготовку самых массовых веществ, входящих в состав аммиачно-селитренных ВВ (АСВВ): аммиачной селитры – окислителя; тротила и гексогена – бризантных ВВ; алюминиевого порошка (пудры) – горючего вещества и других сыпучих компонентов.

Подготовка аммиачной селитры заключается в следующем. Аммиачная селитра (аммония нитрат), NH_4NO_3 – белое кристаллическое

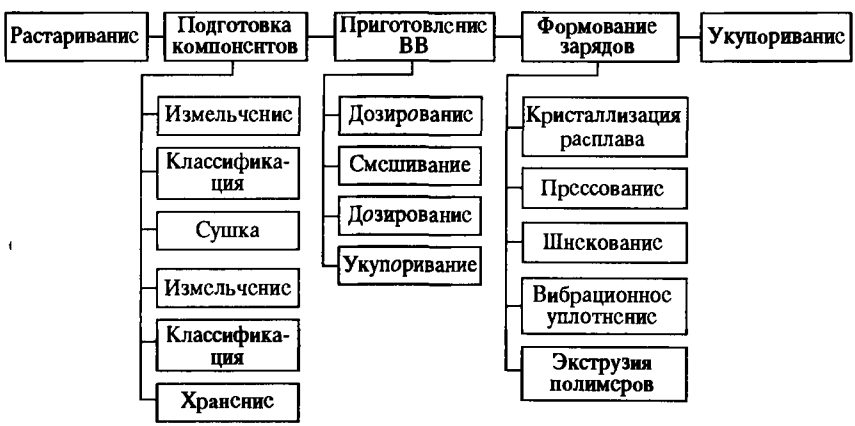


Рис. 3.1. Типовая схема технологии приготовления сыпучих ПВВ [1]

вещество с температурой плавления в сухом виде при 169,6 °С. При превышении этой температуры она разлагается с выделением оксидов азота.

Аммиачная селитра существует в виде нескольких кристаллических модификаций, каждая из которых стабильна лишь в определенных температурных условиях. Переход из одной модификации в другую (рекристаллизация) происходит при следующих температурах: −16; +32; +87 и +125 °С. При переходе изменяется не только форма кристаллов, но их размер и плотность вещества [1]. Так, при 32...33 °С происходит неизбежное полиморфное превращение кристаллов аммиачной селитры из одной ромбической модификации в другую, которое сопровождается увеличением объема на 3% и выделением тепла 21 кДж/кг. Внешним проявлением этого превращения является образование мелкокристаллического порошка, кристаллы которого имеют плотность 1660 кг/м^3.

При температуре 84,1 °С кристаллы *ромбической формы* принимают *ромбоэдрическую форму* с поглощением 22,3 кДж/кг тепла и сокращением объема. Внешним проявлением этого процесса является укрупнение частиц аммиачной селитры.

При температуре 125,2 °С ромбоэдрическая форма кристаллов переходит в *кубическую форму*. В результате образуются клейкие и вязкие частицы.

Аммиачная селитра весьма гигроскопична; растворимость в воде 65% при 10 °С. Водяные пары, поглощаемые из атмосферы, конденсируются на поверхности отдельных кристаллов и растворяют поверхностные слои соли с образованием насыщенного раствора. При испарении влаги (в случае уменьшения относительной влажности воздуха) из насыщенного раствора выделяются кристаллы, которые скрепляют соприкасающиеся частицы селитры. В результате повторного увлажнения и высыхания кристаллы селитры все прочнее связываются, происходит процесс слёживания и уплотнения аммиачной селитры. После длительного хранения при переменной влажности селитра превращается в монолит, с трудом поддающийся дроблению.

Мировое производство аммиачной селитры 14 млн т в год в пересчете на азот (данные 1980 г.) [2]. Для производства ПВВ массовыми сортами является гранулированная селитра марки А и Б: первая предназначена для изготовления в основном заводских гранулированных ВВ, вторая – простейших ПВВ на месте применения. Гранулы селитры этих марок малопористые, плохо поглощают и удерживают жидкие компоненты, вводимые в состав ВВ.

Для простейших гранулированных ВВ заводского изготовления с жидкими нефтепродуктами используют пористую селитру марки П; пористость этой селитры составляет 15–18%, марок А и Б 6–9%.

В пористой селитре адсорбирующая способность гранул относительно солярового масла должна быть не ниже 10%; прочность этой селитры из-за наличия пор ниже, чем прочность гранул селитры марок А и Б.

Для уменьшения гигроскопичности аммиачной селитры и, следовательно, большей водоустойчивости в ее сплав вводят небольшое количество водного раствора сернокислого железа и обрабатывают смесью жирных кислот и парафина, взятых в соотношении 1 : 1 [1]. Обработанную таким образом аммиачную селитру обозначают маркой ЖВ и называют *ожелезненной селитрой*; она менее гигроскопична и менее слёживается, чем чистая селитра.

Для изготовления порошкообразных ПВВ используется кристаллическая водоустойчивая селитра марки ЖВК.

Согласно государственным стандартам содержание влаги в аммиачной селитре составляет: для марок А и Б – 0,3%; марки П – 0,5%; марки ЖВК – 0,8%. Из-за большой гигроскопичности влажность аммиачной селитры при транспортировании и хранении часто повышается до 2,5%, а в отдельных случаях может достигать 3–5%, несмотря на укупорку в водонепроницаемые мешки. В результате аммиачная селитра слёживается, превращаясь в монолитные куски или в одну глыбу в форме мешка.

Подготовка аммиачной селитры для ПВВ состоит в измельчении слежавшегося в мешках продукта, просеивании (классификации) для отделения крупных кусков кристаллической селитры или агломератов гранул и посторонних предметов, сушки продукта (рис. 3.2) [3].

Измельчение аммиачной селитры обеспечивают с помощью дробилок. Для грубого измельчения аммиачной селитры применяют дробилки нескольких типов: щековые (или челюстные); валковые; молотковые (роторные); зубчатые.

Сопротивление кусков увлажненной до 2–3% аммиачной селитры сжатию и разрыву незначительное. Благодаря этим свойствам она лучше измельчается в дробилках с ударно-режущим воздействием рабочих органов, работающих с большими скоростями и простых по конструкции.

Аммиачная селитра со склада транспортером подается на участок подготовки, распаковывается, а затем транспортируется (*1*) на участок грубого измельчения с помощью ленточных и скребковых транспортеров.

Для грубого измельчения (*2*) вначале используют дробилку (или каскад дробилок) роторного типа, а затем молотковую дробилку. Измельченная аммиачная селитра поступает на классификацию (*3*).

Эту технологическую операцию осуществляют на виброситах, где происходит отделение крупной фракции селитры, которая возвращается в отделение дробления (*2*) на молотковую дробилку для повторно-

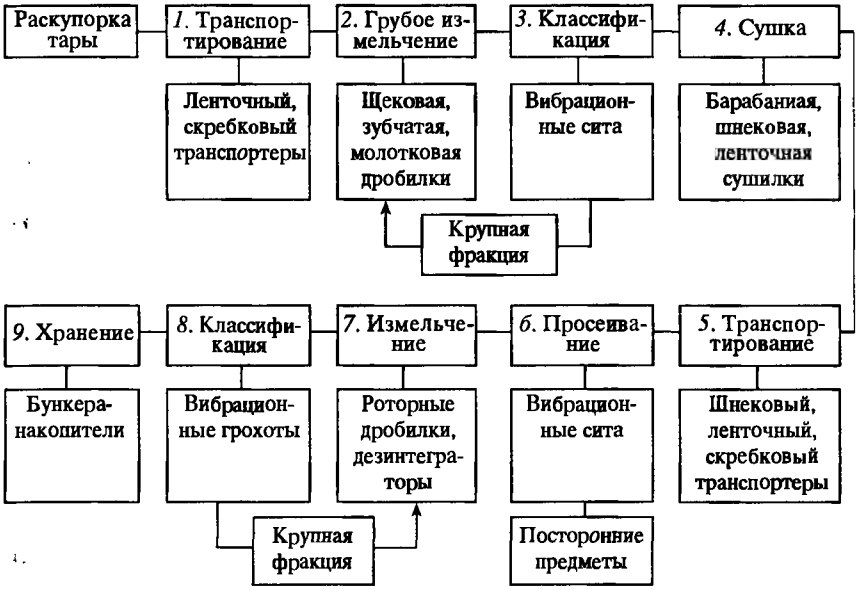


Рис. 3.2. Типовая схема технологии подготовки аммиачной селитры

го измельчения. Фракции среднего и мелкого дробления направляются на операцию сушки (*4*).

Сушка аммиачной селитры может осуществляется в сушильных аппаратах различной конструкции (например, барабанные, шнековые, ленточные и др.). На практике наиболее часто используют барабанные аппараты непрерывного действия. Эти аппараты наклонены к оси горизонта под углом 3–5 град, имеют длину 5–8 м, диаметр 1–1,5 м и частоту вращения 0,2–0,4 $с^{-1}$. Внутри барабана расположены насадки или полки, позволяющие поддерживать во взвешенном состоянии селитру при ее движении к выходу из барабана. Теплоносителем служит подогретый в калориферах воздух или топочные газы, которые подаются к выходу селитры из барабана по принципу противотока (возможно и прямоточное движение сушильного агента).

Обычно используют следующие тепловые режимы:

- воздух или газ обычно имеет при входе в сушилку температуру 100...145 °С;
- температура сушильного агента на выходе 45...60 °С;
- максимальная температура сушки аммиачной селитры в средней зоне сушилки 80...100 °С (не более);
- температура аммиачной селитры на выходе из сушилки 60...70 °С;
- среднее время пребывания селитры в сушилке 25–40 мин.

Выходящие из барабанной сушилки газы или воздух проходят через циклоны для улавливания унесенных частиц селитры.

После сушки продукт влажностью до 0,2% транспортером шнекового, ленточного или скребкового типа подается (*5*) на просеивание, окончательное дробление (измельчение) и классификацию.

В процессе просеивания (*6*) на вибросите задерживаются посторонние предметы, случайно попавшие в массив аммиачной селитры.

Для окончательного измельчения (*7*) высушенной селитры используют двухступенчатую молотковую дробилку или дезинтегратор для помола соответственно на средние и мелкие фракции.

На вибрационных грохотах происходит классификация (*8*) материала на отдельные фракции для последующего подбора нужного гранулометрического состава аммиачной селитры.

В случаях применения аммиачной селитры с высокой степенью дисперсного состава после сушки ее окончательно измельчают в вибрационных мельницах. В ряде случаев окончательное измельчение аммиачной селитры вообще не проводят.

После классификации аммиачная селитра направляется на хранение (*9*) в бункеры-накопители, из которых она затаривается в мешки или направляется на фазу смешивания сыпучих материалов.

Подготовка других окислителей заключается в следующем. Нитраты натрия и кальция, перхлорат аммония имеют следующие особенности. Это гигроскопичные вещества, в производство они обычно поступают с повышенным против требований содержанием влаги (перхлорат аммония для безопасности транспортируют только в увлажненном состоянии). Поэтому эти соли проходят такую же подготовку, как и аммиачная селитра.

Малогигроскопичные окислители, которые содержат влагу 0,2–0,5% (не более), не сушат; они после измельчения и классификации направляются на последующие фазы производства. Если поступающие малогигроскопичные окислители обладают и достаточной дисперсностью, то они только классифицируются.

Режим сушки всех окислителей, за исключением хлоратов и перхлоратов, один и тот же – это сушка горячими воздухом или смесью воздуха с топочными газами при 110...150 °С (в отдельных случаях до 200 °С).

Сушка нитрата кальция должна протекать с таким расчетом, чтобы материал нагревался до температуры 130 °С, при которой он теряет кристаллизационную воду, сильно разрыхляется и выходит из сушильного аппарата в виде тонкого порошка с влажностью не более 0,2%.

Перхлорат аммония сушат при температуре не выше 100 °С.

Процесс сушки может осуществляться в барабанных сушилках с помощью горячего воздуха или смеси воздуха с топочными газами.

При сушке хлоратов и перхлоратов нельзя применять топочные газы, которые загрязняют соли органическими веществами и повышают их взрывоопасность.

Для окислителей, выдерживающих температуру 150...200 °С, могут быть использованы более интенсивные процессы сушки, например, в трубчатых и вибрационных сушилках.

Подготовка тротила заключается в следующем [4, 5]. Тротил (тринитротолуол), $C_6H_2CH_3(NO_2)_3$ – светло-оранжевое кристаллическое вещество. Температура затвердевания химически чистого тринитротолуола 80,85 °С, температура вспышки около 300 °С. Плотность монокристалла тринитротолуола 1663 кг/м^3; гравиметрическая плотность около 850–900 кг/м^3. Тротил довольно хорошо прессуется до плотности 1600 кг/м^3; плотность литого тротила 1550–1590 кг/м^3. Благодаря сравнительно малой чувствительности к механическим воздействиям при удовлетворительном бризантном и фугасном действии тротил является основным бризантным взрывчатым веществом в ПВВ.

Предварительная подготовка тротила, если она необходима, заключается в его измельчении и классификации.

Для непредохранительных АСВВ (аммониты, аммоналы) тротил применяют без предварительной подготовки. Его измельчают в процессе смешивания с аммиачной селитрой, например, в шаровых мельницах.

Для скальных аммонитов, содержащих гексоген, и предохранительных АСВВ, содержащих значительное количество инертных компонентов – пламегасителей, измельчение тротила обязательно. Иначе ВВ этого типа не будут обладать требуемыми взрывными свойствами. Измельчают тротил в шаровых мельницах: диаметр барабана 1,5–2,0 м, длина 0,65–0,9 м; частота вращения барабана мельницы 22–26 об/мин. Для измельчения тротила применяют деревянные (бокаутовые) или пластмассовые шары диаметром 35–40 и 60 мм. Соотношение шаров этих диаметров по весу 1:1.

Подготовка гексогена заключается в следующем. Гексоген (циклотриметилентринитрамин), $C_3H_6O_6N_6$ – кристаллическое вещество белого цвета. Температура плавления гексогена 203,5 °С, плотность монокристалла 1820 кг/м^3. Температура вспышки 230 °С. Гексоген обладает значительно большей мощностью, чем тротил. Вследствие высокой чувствительности чистого гексогена к механическим воздействиям при прессовании используется только флегматизированное ВВ. Значительное применение находит гексоген в виде сплавов с другими низкоплавкими нитросоединениями, например в виде взвеси гексогена в расплавленном тротиле [1, 4].

Гексоген предварительной обработке обычно не подвергают. Он поступает на фазу смешивания в том виде, в каком поставляется.

Предварительную подготовку гексогена не проводят не только вследствие опасности операции, но и потому, что он обладает высокой восприимчивостью к детонации и без измельчения.

Подготовка невзрывчатых сыпучих компонентов, входящих в состав АСВВ, заключается в основном в их просеивании, а иногда и в подсушивании.

Алюминиевая пудра в банках массой 45–50 кг поступает со склада на фазу подготовки компонентов. После вскрытия банок температура пудры проверяется в течение 20 мин и при ее стабильности транспортной системой передается вакуум на фазу смешивания компонентов.

Пламегасители, идущие на приготовление предохранительных ВВ, должны иметь влажность не более 0,2% и дисперсность, при которой основная масса частиц имела бы средний диаметр 0,5–2 мм. Подготовка пламегасителей состоит из их сушки, классификации и измельчения крупной фракции с возвратом ее снова на классификацию. Предварительное измельчение пламегасителей нецелесообразно.

Древесная мука, используемая для промышленных ВВ, производится из хвойных и лиственных пород деревьев; имеет зольность не более 1,5%, высокую дисперсность и влажность около 8%. Подготовка древесной муки включает операцию просеивания для удаления посторонних примесей и сушку до влажности 2–5%. Просеивание до и после сушки обычно проводят на плоских грохотах. Сушат древесную муку, в зависимости от масштабов потребления, по-разному. Если потребление незначительно, то ее сушат в сушильных шкафах, обогреваемых паром, на стальных противнях при температуре 90...100 °С. Длительность сушки при толщине слоя 5–8 см и систематическом перемешивании составляет 60–90 мин (до 5% остаточной влажности). Если же потребность в древесной муке значительная, то ее сушат в лопастных (шнековых) или в пневматических (аэрофонтанных) сушилках.

Пневматические сушилки для древесной муки сконструированы по принципу сушки материала во взвешенном состоянии. Древесная мука поступает в трубу, куда при температуре 60...75 °С нагнетается горячий воздух со скоростью около 10–14 м/с. Труба заканчивается расширительной камерой, где скорость потока значительно падает; здесь материал, находясь во взвешенном состоянии, интенсивно высушивается. Затем материал потоком воздуха уносится в циклон, где оседает его основная часть. Воздух, запыленный древесной мукой, направляется для очистки в камерный фильтр. Отсасывается воздух вентилятором среднего давления.

Подготовка *коллодионного хлопка*, поступающего на производство детонитов и угленитов, состоит из операции сушки от начальной влажности 25–35% до остаточной влажности не более 1,5%. Сушат материал периодическим способом в камерных сушилках с лотками или стеллажами (противнями) в течение 48–96 ч. В качестве сушильного

агента используют воздух, нагретый в калориферах до температуры 35...45 °С. Перед сушкой коллодионный хлопок протирают через сито № 2 для разрушения комков и придания рыхлой структуры.

Подготовка *гидрофобных добавок.* Для повышения водоустойчивости аммиачной селитры в порошкообразные и гранулированные ВВ, предназначенные для взрывных работ в обводненных условиях, вводят гидрофобные добавки – стеараты цинка и кальция, парафин, парафиновый мазут и асфальтит.

Стеараты цинка и кальция обычно находятся в виде сухих порошков и не требуют какой-либо специальной подготовки.

Парафин вводят в состав ВВ в виде стружки или в расплавленном состоянии. Его измельчают на барабанных резаках с ножами. При вращении барабана ножи нарезают стружку парафина, которая затем поступает на смешивание с другими компонентами ВВ. В случае необходимости парафин плавят в простых плавильных аппаратах и в жидком состоянии при температуре 65...70 °С направляют на операцию смешивания сыпучих материалов.

Парафинный мазут приготовляют из топливного мазута и парафина в соотношении 3:2 при растворении последнего в мазуте при 60...70 °С. Расплав приготовляется в плавильных аппаратах и направляется на смешивание компонентов ПВВ при 50...60 °С.

Асфальтит сначала проходит грубое измельчение до кусков размером не более 200 мм в дробилках ударного действия (молотковых или роторных). После дробления его сушат до остаточной влажности 5%. Сухой асфальтит окончательно измельчают обычно в шаровых мельницах. После просеивания через сито № 2 или № 2,5 асфальтит направляют на фазу смешивания.

Все компоненты ПВВ, применяемые для смешивания, должны удовлетворять существующим техническим условиям и иметь разрешение на их допуск к производству.

Приготовление взрывчатых смесей. Подготовленные компоненты ПВВ дозируются весовыми или объемными способами в различные по конструкции смесительные аппараты периодического и непрерывного действия. В результате технологического процесса смешивания отдельные компоненты образуют однородную смесевую композицию ВВ.

Смешиванием в шаровых барабанных смесителях могут изготовляться практически все АСВВ, не содержащие чувствительных к удару сенсибилизаторов, жидких и пастообразных добавок. Этот способ смешивания широко применяют для приготовления почти всех наиболее распространенных предохранительных и непредохранительных аммонитов: № 6, № 6 ЖВ, В-3; аммотолов: 80/20, № 7, № 9, № 10 и др. В этих смесителях сыпучие компоненты не только смешиваются, но дополнительно и измельчаются. В результате получается однородная масса с требуемыми взрывчатыми свойствами.

Порядок дозирования компонентов зависит от состава АСВВ, а длительность смешивания от физико-механических свойств составляющих смесь компонентов.

Смешивание компонентов АСВВ, содержащих в своем составе очень чувствительные к механическим воздействиям сенсибилизаторы (например, гексоген), обеспечивают в тех же барабанных смесителях без шаров. Так приготовляют, например, скальные аммониты № 1 и № 1 ЖВ.

Технологический процесс смешивания таких аммонитов осуществляют в две стадии. Вначале смешивают менее чувствительные или вовсе нечувствительные к удару компоненты (аммиачную селитру, ТНТ, гидрофобизирующие добавки и др.). На второй стадии смешивают двух- или трехкомпонентную смесь с гексогеном (или с гексогеном и алюминиевой пудрой).

Смешивание производят в алюминиевых барабанах без шаров. Барабаны закрывают кожухами с конической нижней частью, через разгрузочный люк которых при разгрузке приготовленный взрывчатый материал ссыпается в тару.

Для процесса смешивания могут быть использованы и другие смесители, например, объемные типа «пьяная бочка».

В производстве скального аммонала для смешивания промежуточной аммонитной массы используются те же шаровые мельницы; окончательное смешивание с гексогеном производится без мелющих тел в барабанно-лопастных смесителях.

При изготовлении предохранительных аммонитов обеспечивают вначале смешивание аммонитной массы и последующее смешивание с пламегасителем (хлоридом натрия) в шаровых мельницах.

Смешивание веществ в производстве гранулированных ВВ (граммонитов, граммоналов) обычно осуществляют в барабанно-лопастных смесителях.

В производстве игданита смешивание аммиачной селитры с дизельным топливом осуществляется в шнековых или лопастных смесителях на стационарных установках и передвижных зарядно-смесительных агрегатах. В этих смесителях дизельное топливо в отмеренных количествах впрыскивается в селитру с помощью форсунок.

Гранулиты марок М и АС-4 изготавливают по технологии смешивания компонентов в барабанно-лопастных смесителях. Гранулиты марок АС-4В и -88 и гранитолы часто изготовляют по технологии смешивания в подогреваемых аппаратах, снабженных мешалками.

Гранулированные ВВ можно получать за счет подачи жидкой фазы на слой сыпучего материала, перемещающегося в полом вращающемся барабане.

В ряде случаев полученные тем или иным способом гранулы сушат для удаления органических растворителей. Процесс гранулирования (например, в окаточном барабане) может совмещаться с процессом сушки.

Способ горячего смешивания компонентов характеризуется следующим. В мировой практике приготовления промышленных АСВВ типа аммотолов 50/50, 80/20 и ряда аммонитов, не содержащих древесной муки, известен способ так называемого «горячего смешивания» компонентов. По этому способу один или несколько компонентов в твердом состоянии смешиваются с компонентом или компонентами, находящимися в расплавленном состоянии (тротилом, динитронафталином или смесью тротила с динитротолуолом). Горячий способ изготовления аммотолов применялся еще в годы первой мировой войны, причем во всех воюющих странах. Этот способ использовался для приготовления аммотолов и во время второй мировой войны. В нашей стране этот способ в настоящее время не применяется.

Горячий способ смешивания может быть осуществлен в виде двух вариантов. По первому в шнековый смеситель вводится тротил или соответствующий ему компонент в расплавленном состоянии, а аммиачная селитра – в подогретом состоянии. По второму способу аммиачная селитра и тротил вводятся в смеситель в сыпучем твердом состоянии; компоненты предварительно подогреваются или вводятся в смеситель без предварительного подогрева. В смесителе перемешиваемая масса выдерживается при температуре порядка 82...84 °С. При этой температуре тротил расплавляется и высоко наполненная дисперсными твердыми частицами аммачной селитры суспензия достаточно интенсивно перемешивается, продвигаясь к разгрузочному люку смесителя. Частота вращения вала смесителя составляет около 25–30 $мин^{-1}$, производительность установки 1,5 т/ч.

Выходящий из смесителя продукт с температурой 74...75 °С попадает в гранулятор с ситом, диаметр отверстия которого 2–2,5 мм. Аммотол протирается для образования гранул при температуре 74...75 °С. При более низкой температуре он образует прочные, крупные комья, грануляция которых почти невозможна.

Форсуночный способ приготовления АСВВ характеризуется следующим. Процессы диспергирования и смешения компонентов ведутся с помощью форсунок, куда компоненты поступают в виде водных растворов аммиачной селитры и в расплавленном состоянии (тротил). Этот способ можно применять только в том случае, если компоненты могут находиться в виде раствора, расплава или если часть компонентов может быть в виде раствора, а часть в виде расплава. Способ может быть использован для приготовления двухкомпонентных промышленных взрывчатых составов типа АС–ТНТ. В настоящее время в нашей стране этот способ не применяется.

Известны способы получения гранулированных ПВВ при распылении жидких компонентов (растворов, суспензий или сплавов) на поверхность твердых частиц псевдоожиженного, взвешенного или фонтанирующего слоя сыпучего материала.

Снаряжение и укупорка ВВ. Изготовленные ПВВ в зависимости от вида и назначения расфасовывают в мешки или пакеты, патронируют в оболочки, формируют в виде шашек разрывных зарядов определенной массы и различных конструкций или снаряжают корпуса перфораторов и торпед для взрывных и прострелочных работ [3, 11].

Порошкообразные и гранулированные ПВВ укупоривают на автоматических или полуавтоматических установках взвешивания. Порошкообразные ВВ расфасовывают в мешки (массой 40 кг для аммонитов) или мешки и пакеты (массой 70–80 кг для гранулированных ВВ) пакетоформующей машиной.

Технологический процесс патронирования и укупорки ПВВ (аммонитов) включает подготовку бумаги и изготовление гильз, подготовку аммонита к патронированию, наполнение гильз аммонитом, нанесение влагоизолирующих покрытий на пакеты и их укупоривание. В случае снаряжения гильз крупного калибра патроны не пакетируют.

Перед патронированием аммониты должны пройти операцию просеивания через магнитные улавливатели, чтобы исключить попадание инородных металлических тел. Патронирование осуществляется на машинах-автоматах шнекового типа или вибраторах.

Снаряженные патроны поступают в аппарат для нанесения влагоизолирующих покрытий методом обливания; после чего они поступают в автомат пакетирования. Отдельные пачки ленточным транспортером подаются на установку нанесения влагоизолирующих покрытий методом пульверизации.

Патроны предохранительных ПВВ пакетируются в герметичные полиэтиленовые пакеты и влагоизоляции не подвергаются.

Пачки и пакеты обычных и предохранительных ПВВ укупоривают в деревянные ящики или в ящики из гофрированного картона. Для улучшения учета и хранения ПВВ, повышения ответственности лиц, работающих с ними, патроны должны быть пронумерованы на автоматах нумерации после операции снаряжения.

Прессованные (скальный аммонал, тротил) и литые (тротил, тротил в смеси с гексогеном,ТЭНом) заряды ПВВ изготовляют на технологических потоках с применением специализированного автоматизированного оборудования.

3.2. Технология пластичных промышленных взрывчатых веществ [3, 6–8]

Пластичные композиционные ВВ (или пластичные ВВ). Эти ВВ представляют собой структурированную полимерную композицию, в которой в качестве непрерывной связующей фазы (матрицы) используют полимерный материал. В полимерной матрице в качестве наполните-

ля распределена твердая дисперсная смесь взрывчатых веществ и специальных добавок.

Подготовка связующих веществ заключается в следующем. В качестве связующих веществ в полимерных композициях применяют различные каучуки; одновременно они являются и горючими составляющими. В вязко-текучем состоянии каучуки смешиваются с различными добавками: пластификаторами, вулканизаторами, катализаторами, красителями и другими специальными добавками. Применение специальных добавок связано с обеспечением необходимых физико-механических свойств получаемых изделий.

Подготовка сыпучей смеси осуществляется по традиционной технологии, ранее рассмотренной для сыпучих рецептур ПВВ.

Получение взрывчатой массы состоит в следующем. Приготовленную смесь бризантного ВВ с другими добавками перемешивают с жидким связующим в смесителях периодического (лопастные, якорные, планетарные) или непрерывного действия (шнековые, двухвальные винтовые или лопастные, вальцовые и др.). На механические свойства наполненных полимерных ВВ в большой степени влияют размер и распределение по размерам частиц наполнителя, их форма, равномерность распределения в полимерной матрице, степень ориентации (для анизотропных наполнителей), свойства поверхности раздела фаз. Количество наполнителя в пластичных взрывчатых материалах может изменяться в широких пределах; в высоконаполненных композициях оно иногда превышает содержание полимера. Так, например, пластичное ВВ – гексопласт ГП-87К содержит, %: гексоген – 82,5; бутилкаучук – 13; фторопласт – 1,5; цинковые белила – 3; лецитин – 0,1% [3].

Полученная наполненная полимерная смесь взрывчатого материала в общем случае может находиться в твердом аморфном (с частичной кристаллизацией) или стеклообразном состоянии, твердом высокоэластическом и жидком вязко-текучем состояниях. Пребывание взрывчатого материала в том или ином физическом состоянии, частичная или полная кристалличность его объема и обусловленный этим комплекс механических свойств материала определяют характер его применения. Так, пластичные взрывчатые материалы, находящиеся при обычной температуре в стеклообразном состоянии или же в значительной степени закристаллизованные, являются, как правило, жесткими материалами и получили название *пластики* или *пластиты*.

Пластичные взрывчатые материалы, находяшиеся в высокоэластическом состоянии – *эластомеры* или *эластиты*, имеют свойства резиновых изделий. Основное же значение вязко-текучего состояния полимерных композиций заключается в том, что оно позволяет перерабатывать в изделия подавляющее большинство наполненных полимеров, осуществлять процесс формования изделий.

Формование готовых зарядов из эластитов в виде шнуров, лент, пластин обеспечивают прессованием, экструзией, вальцеванием, литьем под давлением и др. Специальные оболочки и формы заполняют пластитами методами экструзии, прессованием и литьем под давлением.

Технологическая схема установки непрерывного изготовления пластичных ВВ представлена на рис. 3.3 [6]. Энергонасыщенный сыпучий материал из бункера *1* и через загрузочное устройство *2* поступает в ви-

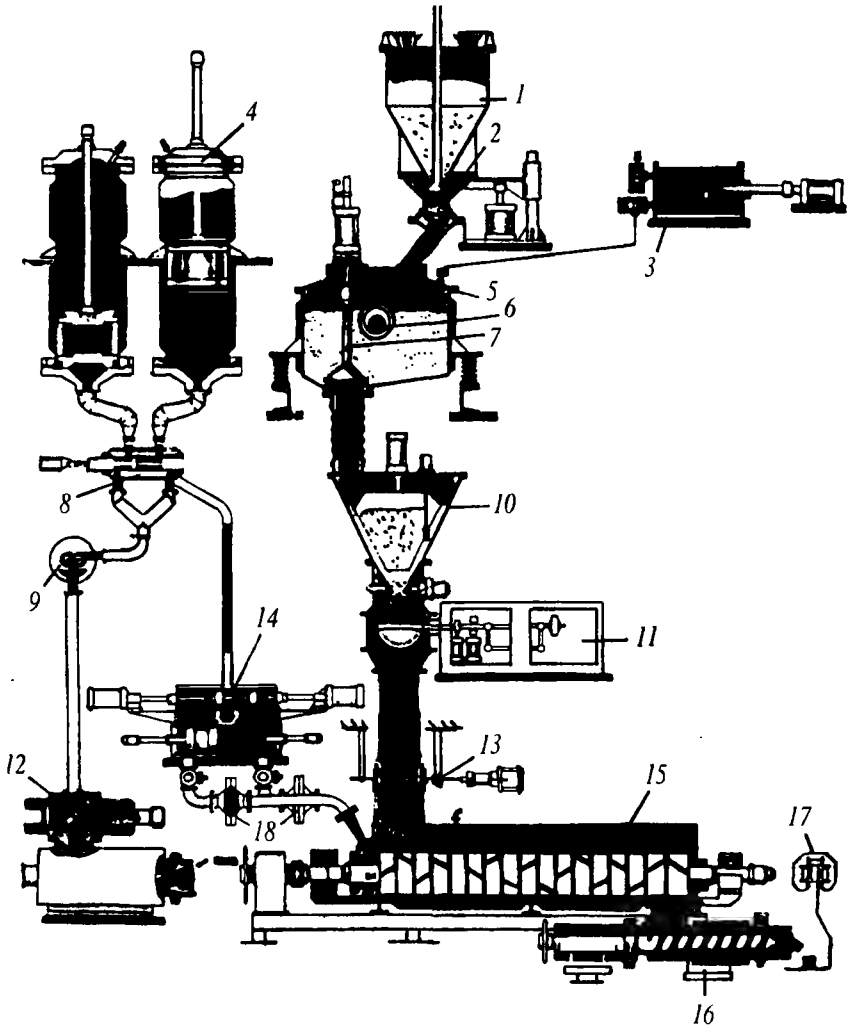


Рис. 3.3. Технологическая схема установки непрерывного изготовления пластичных композиционных ПВВ

брационный смеситель *5* с дебалансным валом *6*. В этот же смеситель распыляется индустриальное масло с помощью объемного дозатора *3*. В смесителе твердые частицы обволакиваются тонким слоем масла, которое обеспечивает флегматизирующее действие; при этом смесь остается в сыпучем состоянии. После завершения процесса смешивания при открытом затворе *7* сыпучая смесь поступает в бункер *10* и далее вибропитателем направляется на устройство весового дозирования *11*. Пройдя вибросито *13*, сыпучая смесь поступает в двухвальный смеситель *15* для перемешивания с пластифицированным полимерным связующим, которое поступает в смеситель с помощью объемного дозатора соотношений *14*, пройдя фильтры *18*. В объемный дозатор полимерное связующее поступает из двух поочередно работающих бункеров-питателей *4*, золотника-распределителя *8*, объемного насоса *9* и дозатора соотношений *12*.

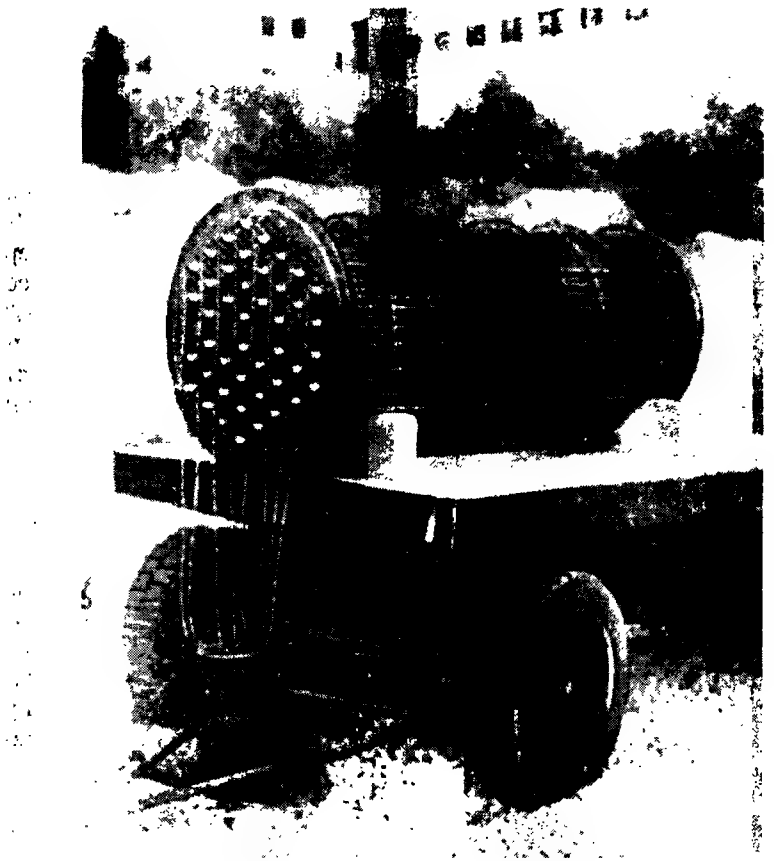


Рис. 3.4. Развальцовка труб с помощью взрыва шнуровых зарядов

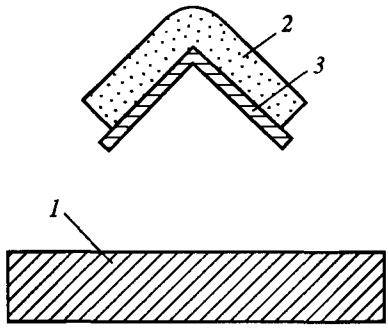


Рис. 3.5. Схема резки металла кумулятивным ленточным зарядом:
1 – металлическое изделие; *2* – взрывчатое вещество; *3* – металлическая кумулятивная полоса

На выходе из непрерывно действующего двухвального смесителя полимерное связующее и сыпучий наполнитель превращаются в однородную двухкомпонентную взрывчатую смесь с заданным соотношением компонентов. В шнековой установке выгрузки *16* взрывчатый пластичный материал формируется в виде отдельных монолитных блоков, которые поступают на приемное устройство транспортера *17*.

В дальнейшем из полученных блоков ПВВ формуют, например методом экструзии или прокатки на валках, изделия различной формы (шнуры, ленты и др.).

В качестве примера на рис. 3.4 показана установка развальцовки труб в торцевой решетке теплообменного аппарата с использованием шнуровых зарядов из пластичных ПВВ [7].

На рис. 3.5 представлена схема резки металла взрывом с помощью кумулятивных ленточных зарядов из пластичных ПВВ [7].

Нитроэфиросодержащие ВВ. При изготовлении нитроэфиросодержащих предохранительных ВВ (угленитов) технологический процесс осуществляют в две фазы. Вначале смешивают сыпучие компоненты и гидрофобизируют их стеаратами. Окончательное смешение сыпучих компонентов со слабожелатинизированными нитроэфирами осуществляют в лопастных смесителях для пластичных высоковязких материалов [3].

3.3. Водосодержащие промышленные взрывчатые вещества [8–10]

Гелеобразные взрывчатые смеси. Основополагающая идея технологии производства водосодержащих ВВ состоит в том, чтобы насыщенный водный раствор окислителя (аммиачной селитры, нитратов натрия и калия или их смесей) использовать в качестве сплошной дисперсионной среды; в этот водосодержащий состав диспергировать смесь сыпучих взрывчатых материалов (тротил, алюмотол, гексоген и др.), горючих веществ (алюминиевая пудра), загуститель (гелеобразующее вещество) и другие добавки.

Качество водосодержаших ВВ зависит от их физической стабильности; ее нарушение проявляется в расслоении структуры ВВ на две фазы и приводит к нестационарному режиму детонации или даже от-

казам. Надежным является способ регулирования стабильности ВВ путем повышения вязкости жидкой фазы введением в ее состав высокомолекулярных соединений – загустителей.

Стабильность водосодержащих ВВ, состоящих из аммиачной селитры, гранулотола и воды, можно достигнуть введением 4%-ного раствора карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) очищенной марки или 7%-ного раствора КМЦ технической марки со степенью полимеризации 300–400, а также 1–2% полиакриламида [8, 10].

Для увеличения стабильности ВВ, жидкая фаза которых представлена 85%-ным раствором аммиачной селитры, необходимо, чтобы температура ВВ не превышала 68 °С. Если концентрация раствора 80%, то температура ВВ должна быть не более 50 °С. При дальнейшем снижении температуры вязкость взрывчатой смеси резко увеличивается. Поэтому нижний предел – критическую температуру взрывчатой смеси определяют из условия текучести гелеобразной структуры.

Способ осуществления стабильности гелеобразных ВВ путем оптимизации температурных режимов прост в осуществлении, так как требуемая температура взрывчатой смеси легко достигается за счет регулирования температуры раствора аммиачной селитры при перемешивании с твердыми компонентами.

К числу важнейших параметров гелеобразных ВВ относят их консистенцию, т.е. объемное или массовое содержание твердой фазы. Консистенция системы определяет взрывчатые и технологические свойства гелеобразных ВВ. Она влияет на теплоту и работу взрыва, реологические характеристики смеси (вязкость, предельное напряжение сдвига), гидродинамические параметры транспортирования и теплофизические свойства ВВ.

Технология приготовления гелеобразного ВВ включает следующие основные фазы производства [10]:

- приготовление раствора окислителей;
- подготовку твердых сыпучих компонентов (тротила, гранутола, алюмотола и др.);
- подготовку горючих добавок (порошка алюминия);
- перемешивание компонентов с загустителем с образованием гелеобразного ВВ или загрузку отдельных компонентов в смесительно-зарядную машину.

Типовой комплекс приготовления гелеобразных ВВ на месте их применения рассмотрен в разд. 3.5.

Эмульсионные взрывчатые вещества. Все водоэмульсионные ВВ состоят в основном из высококонцентрированного раствора аммония азотнокислого (иногда с добавками натрия азотнокислого или кальция азотнокислого) и жидкого нефтепродукта (дизельное топливо, индустриальное масло, мазут и т.п.). Раствор окислителей, нагретый до 60...90 °С, диспергируют и эмульгируют добавкой небольшого количе-

ства эмульгатора в нагретом жидком нефтепродукте так, чтобы каждая капелька раствора была покрыта тонкой пленкой нефтепродукта.

Примерный состав компонентов ЭВВ следующий, массовые доли, % [8, 9]:

Селитра аммиачная	60–63
» натриевая	16–19
Эмульгатор	1–1,5
Масло (нефтепродукты)	7
Вода	15
Кислота азотная	до 0,3

Технологический процесс получения ЭВВ на модульной установке показан на рис. 3.6 [8, 10].

Модульная установка состоит из шести модулей:

1 – подготовка и подача окислителей, включающие технологические блоки приготовления водных растворов аммиачной или натриевой селитры, накопления и дозирования растворов;

2 – подготовка нефтепродукта, эмульгатора, приготовление и дозирование их смеси;

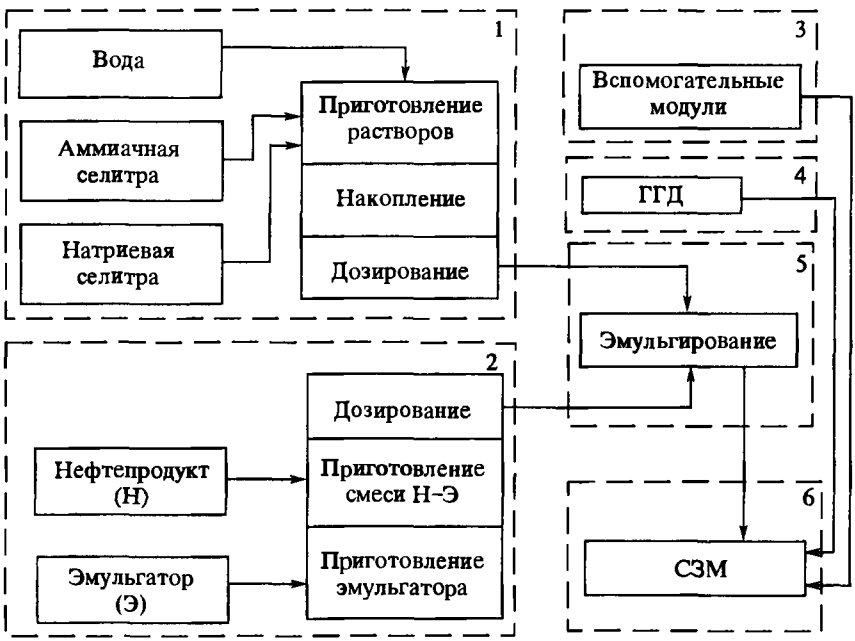


Рис. 3.6. Схема технологии приготовления ЭВВ

3 (вспомогательный) – включает блоки приема промышленных промывочных стоков и их очистку, а также блоки гидро-, электро- и пневмооборудования;

4 – подготовка нитрита натрия и приготовление раствора газогенерирующей добавки (ГГД);

5 – эмульгирование;

6 – смесительно-зарядная машина (СЗМ).

Подготовка и подача окислителя: аммиачная селитра марки А (ГОСТ 2–85) из мешков по 60 кг растаривающей установкой с винтовыми (шнековыми) конвейерами подается поочередно в один из аппаратов растворения. Натриевая селитра марки А (ГОСТ 828–77) при необходимости поступает в аппараты растворения аналогично аммиачной селитре.

Аппараты растворения представляют собой вертикальные цилиндрические емкости, снабженные змеевиком для обогрева паром и оборудованные мешалкой с электроприводом. В аппарат поочередно подаются: вода насосом до заполнения заданного уровня; окислитель (аммиачная и натриевая селитры) в соответствующих количествах при работающей мешалке. По окончании загрузки селитр при достижении температуры раствора окислителей в аппарате 80 °С и необходимой плотности раствора, готовый раствор перекачивается насосом в накопительные емкости. Для получения эмульсии необходимого качества раствор окислителей из накопительных емкостей специальными дозирующими насосами подается в модуль приготовления эмульсии.

Подготовка нефтепродукта и эмульгатора: нефтепродукт (например, индустриальное масло, ГОСТ 20799–88) из емкостей хранения насосом перекачивается в смесительную емкость, где подогревается до температуры 40...70 °С. Эмульгатор из бочки перекачивается в смеситель с нефтепродуктом с помощью устройства всасывания, которое состоит из приемника и всасывающей трубы. При температуре окружающей среды менее 10 °С бочки с эмульгатором нагреваются в обогреваемой камере.

В смесительный аппарат нефтепродукт и эмульгатор подаются насосами в заданном соотношении; после его заполнения смесь подогревается до температуры 65...75 °С и перемешивается в течение 3–5 мин. Из аппарата смесь нефтепродукта с эмульгатором насосом дозируется в модуль приготовления эмульсии.

Приготовление раствора газогенерирующих добавок (ГГД): нитрит натрия из мешков по 40 кг шнековым транспортером через загрузочную воронку загружается в аппарат растворения, в который предварительно подается вода до заданного уровня; раствор готовится при температуре 75...80 °С. Приготовленный раствор ГГД насосом по мере необходимости перекачивается в емкость СЗМ.

Рис. 3.7. Загрузка СЗМ фирмы "IRECO" (США) на рабочей площадке вблизи карьера

Эмульгирование: в аппарат эмульгирования (миксер) непрерывно дозируется раствор окислителей, смесь нефтепродуктов с эмульгатором, где при температуре 80...85 °С производятся их диспергирование и образование эмульсии типа «вода в масле». Полученная эмульсия из миксера специальным героторным насосом перекачивается в накопительную емкость эмульсии или в СЗМ.

Загрузка СЗМ: в смесительно-зарядной машине установлены емкости для последовательного заполнения горячей водой, раствором ГГД и эмульсией. Загрузка СЗМ эмульсией обеспечивается насосами, установленными в модулях эмульгирования или самотеком из накопительной емкости. Заправка СЗМ раствором ГГД разрешается и после загрузки СЗМ эмульсией. При низких температурах окружающей среды (менее −10 °С) перед загрузкой СЗМ ее емкости подогревают острым паром.

В качестве примера на рис. 3.7 показана загрузка СЗМ отдельными компонентами эмульсионных ВВ [8]; их взрывчатая смесь образуется только в скважине.

3.4. Технология промышленных взрывчатых веществ на карьерах и рудниках [8, 10, 11]

Способы производства ПВВ. Водосодержащие и простейшие ПВВ можно производить тремя способами [8, 10]:

- первый – в заводских условиях с упаковкой в тару;

- второй – на стационарных пунктах, расположенных вблизи карьеров, рудников, шахт, с последующей транспортировкой готовых смесей зарядными машинами к месту ведения взрывных работ;
- третий – раздельной транспортировкой компонентов к месту ведения взрывных работ с приготовлением взрывчатых смесей в передвижных СЗМ с последующим заряжанием.

Первый способ не позволяет регулировать рецептуру состава в широких пределах, является более дорогостоящим и опасным. Так, водосодержащие гелеобразные ВВ, изготовляемые на заводе и заряжаемые затем в скважины под давлением, бывают более разбавленными и часто более чувствительными. В противном случае они с трудом перекачиваются через шланг в скважину. Кроме того, они содержат относительно большое количество воды. Более чувствительные, не полностью загущенные водосодержащие ВВ транспортируют по обычным дорогам общего пользования. Для обеспечения легкости заряжания дополнительные сгустители вводят в состав непосредственно при заряжании в скважину, что обеспечивает необходимую вязкость состава для предотвращения расслаивания суспензии (сларри) при заряжании.

По второму способу изготовление промышленных ВВ на месте вблизи потребителя ведется в малогабаритных мобильных модулях. Они включают в себя химическую лабораторию, емкости для хранения компонентов ВВ, поточную линию для приготовления ВВ (дробилки, сита, дозаторы, смесители), заканчивающиеся, как правило, транспортировкой готовых взрывчатых смесей к месту ведения взрывных работ. В таких мобильных модулях более легко варьировать содержание компонентов в смеси по требованию покупателя и условия проведения взрывных работ. Для увеличения производительности приготовления ВВ на таком мини-заводе достаточно смонтировать дополнительную модульную линию.

Третий способ намного более удобен и безопасен, так как перевозится не ВВ, а его отдельные компоненты. На полевой рабочей площадке вблизи карьера обеспечивается раздельная загрузка СЗМ: сыпучими компонентами и раствором нитратов (для гелеобразных ВВ); эмульсией и ГГД (для эмульсионных ВВ); гранулированной аммиачной селитрой и нефтепродуктами или суспензией нефтепродуктов с горючими веществами (для простейших промышленных ВВ типа АС–ДТ). Взрывчатая смесь образуется только в процессе смешения компонентов при заряжании скважины.

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция увеличения объема потребления и роста номенклатуры взрывчатых веществ, изготовляемых из невзрывчатых компонентов вблизи мест их применения. Их доля в 2001 г. составила более половины общего объема используемых при взрывных работах [11].

Технология простейших промышленных взрывчатых смесей. Приготовление простейших ПВВ типа гранулитов и игданитов включает фазу подготовки аммиачной селитры, дизельного топлива или нефтяного масла, а также дисперсного горючего (алюминиевый порошок и его сплавы) [8, 10].

Подготовка АС заключается в механизированных операциях разрезания мешков, просеивании, дроблении и загрузке ВВ в бункер-накопитель. Используют несколько типов растаривающих устройств:

- вибрационные установки, работа которых заключается в перемещении мешка с аммиачной селитрой направленными колебаниями и разрезании ножом;
- вращающиеся барабаны, в которых мешок протаскивается через неподвижные ножи.

В этих установках одновременно осуществляются процессы просеивания и измельчения гранулированной аммиачной селитры; установки также могут быть использованы для подготовки гранулированных ВВ типа тротила, гранулотола, алюмотола и др. Конструкции и принцип работы установок рассмотрены в подразд. 5.4.

Подготовка горючих материалов заключается в следующем. Емкость гидровакуумного смесителя заполняют дизельным топливом и вакуумируют. Вскрывают банки с алюминиевым порошком, и с помощью вакуумного транспорта порошок через гибкий шланг поступает в смеситель. Затем насосом осуществляют циркуляционное перемешивание дизельного топлива с алюминиевым порошком до образования однородной суспензии, в которой сплошной дисперсионной средой является дизельное топливо, а дисперсной фазой – твердые частички алюминия.

Смешивание компонентов является заключительной операцией. После приготовления суспензия насосом подается в шнековый смеситель, где происходит распыление суспензии или дизельного топлива на дисперсные частицы аммиачной селитры в процессе непрерывного смешивания.

Процесс приготовления гранулитов (игданитов) контролируют по уровню суспензии (или дизельного топлива) в гидровакуумном смесителе и расходу аммиачной селитры при ее поступлении из бункера-питателя в шнековый смеситель. При необходимости поступление селитры регулируют шибером бункера-питателя с помощью электропривода. Это позволяет выдерживать соотношение компонентов гранулитов и игданитов.

В производстве игданитов также используют специализированные измельчительно-смесительные установки, конструкция и принцип работы которых рассмотрены в подразд. 5.4.

Комплексы по производству водосодержащих ВВ. Комплекс состоит из пункта приготовления раствора-окислителя, пункта подготовки сухих компонентов, линии подготовки металлических дисперсных горючих добавок, а также транспортно-зарядных и транспортно-доставочных агрегатов [10].

На пункте приготовления раствора окислителя (рис. 3.8) контейнеры *1* с аммиачной селитрой выгружают с автотранспорта с помощью электротали *2* на контейнерную площадку вместимостью до 20 контейнеров.

В дальнейшем контейнер ставят на тележку *3* и подают в здание пункта, где мешки с аммиачной селитрой выгружают на растариватель-рыхлитель *4* с просеивателем *5*. Разрыхленную аммиачную селитру камерным пневмонасосом *6* подают в аппарат *7* для приготовления водного раствора аммиачной селитры, оборудованный механической мешалкой и змеевиком для обогрева горячим паром.

Готовый раствор аммиачной селитры насосом *8* подают в емкость-накопитель *9*, снабженный механической мешалкой и змеевиковым нагревателем. Над аппаратами установлена таль 2 для подачи загусти-

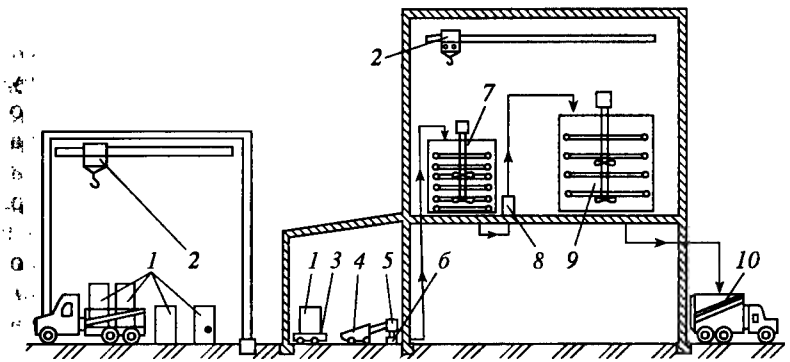


Рис. 3.8. Пункт приготовления раствора-окислителя

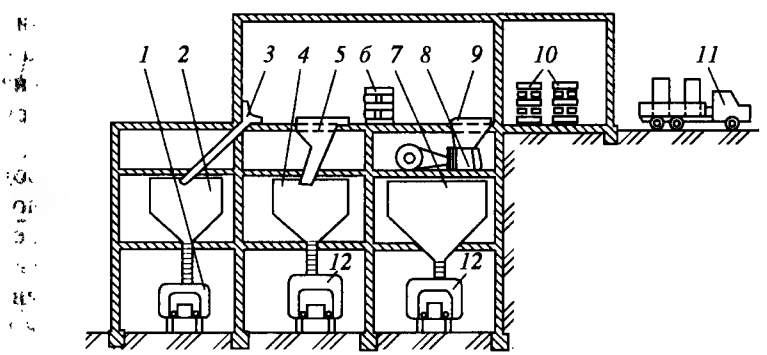


Рис. 3.9. Пункт подготовки сухой гранулированной аммиачной селитры и гранулированного тротила:

1 – агрегат для вывоза тары; *2, 4, 7* – бункеры; *3* – лоток; *5* – сито; *6, 10* – штабеля; *8* – дробилка; *9* – рыхлитель; *11* – транспортное средство; *12* – СЗМ

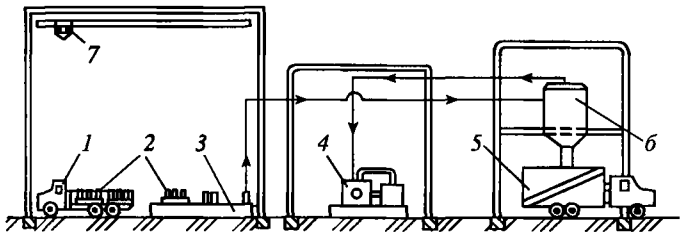


Рис. 3.10. Линия для переработки металлических порошков

телей в раствор окислителя. Из накопительной емкости готовый раствор подают в транспортный агрегат *10* раствора окислителя.

Устройство пункта подготовки сухой гранулированной аммиачной селитры и гранулированного тротила показано на рис. 3.9. Доставленную на пункт аммиачную селитру и гранулированный тротил выгружают в штабеля с аммиачной селитрой или ТНТ либо подают непосредственно на столы растаривания для аммиачной селитры или гранулированного тротила. Для рыхления слежавшейся аммиачной селитры на пункте установлена дробилка. Рыхленная аммиачная селитра накапливается в бункере, а гранулированный тротил растаривают и накапливают в другом бункере. Затем аммиачную селитру и тротил поочередно подают в отдельные бункера смесительно-зарядных машин. Тара из-под аммиачной селитры и гранулированного тротила поступает по лотку в бункер, а затем в специальный агрегат для вывоза за пределы пункта и уничтожения.

Линия для переработки металлических порошков (рис. 3.10) состоит из площадки *3* для переработки поддонов с бочками *2* металлических добавок, здания для размещения технологического оборудования и эстакады с бункером-осадителем. С помощью вакуумного насоса *4* металлические добавки из бочек поступают в бункер-осадитель *6*, а из бункера самотеком в зарядный агрегат *5*. Бочки доставляются автомобилем *1* и разгружаются кран-балкой *7*..

Смесительно-зарядные машины. Для механизации взрывных работ на карьерах используют зарядные машины, предназначенные для доставки ВВ от пункта складирования или производства и последующего заряжения скважин, и смесительно-зарядные машины, в которых транспортируются компоненты, не являющиеся сами по себе взрывчатыми веществами. В СЗМ взрывчатые вещества приготовляются в момент смешивания компонентов в процессе заряжания скважин.

В зависимости от типа используемого ВВ все зарядные и смесительно-зарядные машины разделяют для работы с применением взрывчатых веществ, изготовленных из смеси АС – ДТ, и водосодержащих взрывчатых веществ (гелеобразных и эмульсионных).

Смесительно-зарядные машины для взрывчатых смесей типа АС–ДТ по способу подачи смеси в скважину подразделяют на машины с пневматической и шнековой выгрузкой ВВ. Такие машины выпускают ряд фирм США, Великобритании, Канады, Швеции и др.

Принцип, заложенный в конструкцию этих машин, одинаков. Компоненты ВВ, например, аммиачную селитру и дизельное топливо, помещают в изолированные емкости, а затем при заряжании подают одновременно в смесительную камеру в определенном соотношении. Смеситель представляет собой камеру с форсунками, распыляющими дизельное топливо в тот момент, когда аммиачная селитра поступает в камеру со шнекового или вибрационного транспортера, связанного с бункером аммиачной селитры через затвор с гидравлическим приводом. Готовую смесь транспортируют в скважину сжатым воздухом по гибкому зарядному шлангу или с помощью выгрузного шнека.

Фирма «Америнд Маккиссик» (США) выпускает СЗМ с пневматической или шнековой подачей ВВ в скважину. Выполняемые технологические операции включают выгрузку аммиачной селитры из бункера в транспортный шнек, измельчение в дробилке и смешивание с дизельным топливом. Машина снабжена системой приготовления и заряжания скважин составом АС–ДТ в смеси с алюминиевым порошком.

Установка «Эмикс», изготовляемая фирмой «Нитро Нобель» (Швеция), может быть стационарной или смонтированной на шасси автомобиля (рис. 3.11) [10]. Она состоит из: бункера *2* для засыпки амми-

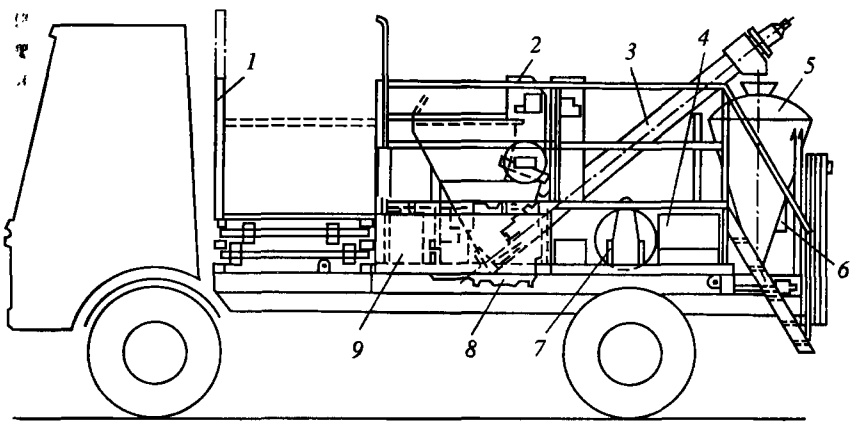


Рис. 3.11. Установка «Эмикс» для приготовления взрывчатой смеси типа АС–ДТ:

1 – подъемная площадка; *2* – приемный бункер для засыпки аммиачной селитры; *3* – шнековый перегружатель; *4* – система подачи дизельного топлива; *5* – зарядчик; *6* – пульт управления; *7* – компрессор; *8* – маслостанция; *9* – гидросистема

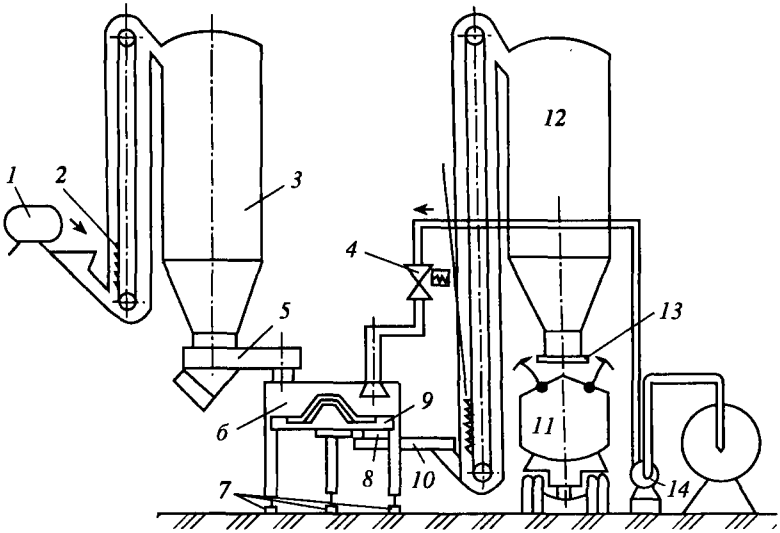


Рис. 3.12. Механизированный комплекс по приготовлению взрывчатой смеси типа АС–ДТ:

1 – аммиачная селитра в таре; *2* – элеватор; *3* – приемный бункер; *4* – дозировочный клапан; *5* – вибрационный питатель; *6, 10* – шнеки; *7* – вибраторы; *8, 9* – узел приготовления смеси АС–ДТ; *11* – транспортно-зарядная машина; *12* – бункер смеси АС–ДТ; *13* – дозатор; *14* – насос перемещения дизельного топлива

ачной селитры; наклонного шнекового транспортера (перегружателя), подающего аммиачную селитру в смеситель; гидравлической и электрической схемы исполнительных органов; системы подачи минеральных добавок и контроля управления установкой во время работы. Производительность такой установки 1,5–3 т/ч.

Стационарный комплекс по приготовлению взрывчатой смеси АС–ДТ на руднике Кируна (Швеция) приведен на рис. 3.12 [10]. Он состоит из бункера *3* для аммиачной селитры, емкости хранения дизельного топлива, устройства приготовления взрывчатой смеси, бункера *12* для хранения АС–ДТ. Комплекс снабжен транспортными и дозирующими устройствами, насосом *14* перемещения дизельного топлива, установками электрического и гидравлического снабжения, контрольно-измерительной системой и пунктом управления.

Смесительно-зарядные машины для водосодержащих ВВ имеют те же принципы, что и машины, предназначенные для заряжания скважин смесями типа АС–ДТ. Они заключаются в том, что при транспортировании компоненты, которые сами по себе не являются ВВ, находятся в различных изолированных емкостях и смешиваются только в процессе подготовки к заряжанию. Типичная схема такой СЗМ имеет одну или несколько емкостей для жидких компонентов и несколько бун-

керов для твердых. Под разгрузочными люками бункеров смонтированы питатели (шнековые, вибрационные), которые подают твердые компоненты с постоянной или регулируемой скоростью в смеситель. Жидкие компоненты подаются в смеситель с помощью шланговых или героторных насосов или др.

Для приготовления гелеобразных ВВ нужной консистенции в смесительное устройство из специальной емкости подают загуститель. В случае приготовления эмульсионных ВВ в камеру смешения вместе с эмульсией подают раствор нитрита натрия в качестве газогенерирующей добавки и сухие компоненты.

Основным поставщиком смесительно-зарядных машин для приготовления и заряжания водосодержащими ВВ являются фирмы «Ирека Кемикэлз» (США), «Канадиан Индасстриз лтд» (Канада), «Эфрикэн Эксплозивс эн Кемикэл» (ЮАР), «Нитро Нобель» (Швеция) и др. Машины этих фирм (см. рис. 1.3), как правило, оснащены приборами, указывающими консистенцию взрывчатой смеси, скорость нагнетания и расход ВВ, закачиваемого в скважину. Управление процессами смешивания компонентов, подачи компонентов, аэрации, нагнетания смеси в скважину осуществляются в автоматизированном режиме с электронного кнопочного пульта управления, расположенного в кабине машины, либо в задней части машины. Устройство машин и приборов управления позволяют изменять соотношение компонентов в процессе заряжания. С помощью этих машин можно формировать заряды различной конструкции, а также автоматически изменять соотношение компонентов в процессе заряжания по заданной программе автоматизированного управления с помощью установленного процессора.

Дополнительные сведения о зарядно-транспортных и зарядно-смесительных устройствах, допущенных Госгортехнадзором России к применению в Российской Федерации, можно получить в [10, 11].

Типовые процессы химической технологии. Проведенное краткое знакомство с технологией ПВВ показало, как много различных видов взрывчатых веществ используются для взрывных работ в мирных целях.

Промышленные ВВ отличаются по составу, физическому состоянию и назначению. В то же время в основе их производства лежат типовые процессы химической технологии:

- *механические* (измельчение твердых материалов, классификация сыпучих материалов, дозирование и смешение их, компактирование, гранулирование и др.);
- *гидромеханические*, скорость которых определяется законами гидродинамики. К ним относятся осаждение взвешенных в жидкой и газообразной средах частиц под действием силы тяжести, центробежной силы или других сил физического воздействия, фильтрование жидкостей и газов через слой зернистого материала под действием разности давлений, перемешивание в

жидкой среде, эмульгирование, псевдоожижение твердого зернистого материала и др.;

- *тепловые*, скорость которых определяется законами теплопередачи. В эту группу входят процессы нагревания и охлаждения;
- *массообменные (диффузионные)*, скорость которых определяется скоростью перехода вещества из одной фазы в другую, т.е. законами массопередачи. К диффузионным процессам относятся кристаллизация, адсорбция, сушка, желатинизация, гидрофобизация и др.

Часто некоторые из этих процессов протекают одновременно, что усложняет их расчет и практическую реализацию, связанную с выбором технологических режимов работы и проектированием необходимого оборудования.

Литература

1. *Бутников М.А., Левкович Н.А., Быстров И.В.* и др. Взрывчатые вещества и пороха. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1955. – 363 с.
2. *Васильев М.Г.* Химический комплекс России. – М.: НИИТЭХИМ, 2002. – 361 с.
3. *Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И.* Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1973. – 320 с.
4. *Орлова Е.Ю.* Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. – М.: Химия, 1981. – 311 с.
5. *Збарский В.Л., Жилин В.Ф.* Толуол и его нитропроизводные. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 272 с.
6. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период / Под ред. Н.Г. Пузырева.– СПб.: Гуманистик, 2001. – 928 с.
7. *Степанов В.Г., Шавров И.А.* Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-е), 1975. – 280 с.
8. *Кук М.А.* Наука о промышленных взрывчатых веществах. – М.: Недра, 1980. – 455 с.
9. *Жученко Е.И., Иоффе В.Б., Кукиб Б.Н.* и др. Эмульсионные взрывчатые вещества: Сб. науч. трудов / РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М., 2000.–.С. 339–349.
10. Механизация взрывных работ: Справочное пособие / А.М. Бейсабаев, И.Е. Ерофеев, А.А. Егупов и др. – М.: Недра, 1992. – 272 с.
11. Перечень взрывчатых материалов, оборудования и приборов взрывного дела, допущенных к применению в Российской Федерации. Сер. 13. Вып. 2 / Кол. авт. – М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 80 с.

ГЛАВА 4

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА

4.1. Непрерывный континуум и понятие о сплошной среде

Промышленные ВВ в общем случае представляют собой сложный конгломерат компактно расположенных частиц (молекул), имеющих различную форму и ориентацию, между которыми возникают разнообразные по своей природе связи взаимодействий. Их размеры могут колебаться от микроскопических частиц до макроскопических агломератов. На первый взгляд, установление математического эквивалента для столь сложного по сравнению с жидкостями и твердыми телами материала является неразрешимой задачей. Тем не менее посмотрим, что представляла бы собой такая математическая формулировка, если бы она существовала.

Так как изменение относительного расположения частиц (молекул) представляет собой *деформацию*, то необходимо более близко познакомиться с абстрактным континуумом.

Все тела независимо от степени их непрерывности состоят из дискретных молекул, связанных друг с другом силами взаимного притяжения или отталкивания. При отсутствии граничных силовых воздействий тело не деформируется, и можно сказать, что молекулы находятся в состоянии относительного равновесия. При приложении системы сил к некоторому участку границы тела в нем развиваются деформации, изменяются расположение молекул и распределение соответствующих молекулярных сил в пределах всего тела.

Интенсивность молекулярных сил может быть весьма высокой, но расстояния, на которых они действуют, очень малы. Обычно их влияние распространяется только на расстояния, равные молекулярным размерам, т.е. в непосредственной близости от молекул. Если относительные расстояния в системе молекул очень велики (по сравнению с молекулярными размерами), математически область влияния этих сил может быть принята приближающейся к нулю, и они будут действовать только в непосредственной близости к точкам расположения молекул. Внутренние силы, возникающие в этих точках, называются *напряжениями*.

Если в окрестности некоторой точки на площадке ΔF с нормалью $\boldsymbol{n}$ действует сила $\Delta \boldsymbol{P}_n$, то напряжение в этой точке выразится вектором

$$\boldsymbol{p}_n = \lim_{\Delta F \to 0} (\Delta \boldsymbol{P}_n / \Delta F).$$

Далее будем полагать справедливыми два главных допущения применительно к твердым дисперсным системам [1].

1. *Размеры включений или неоднородностей* (диаметры дисперсных частиц, капель, пор и т. п.) *во много раз больше молекулярно-кинетических* (расстояний между молекулами, размеров кристаллической решетки). Таким образом, указанные неоднородности содержат большое количество молекул. Но при этом имеет место следующее.

2. *Размеры указанных неоднородностей в свою очередь во много раз меньше расстояний, на которых осредненные или макроскопические параметры дисперсной смеси или фаз меняются существенно.* Таким образом, размеры неоднородностей намного меньше размеров дисперсного тела или расстояний до границ сыпучего массива.

Понятие о напряжениях и требование, чтобы расстояния до границ тела были велики по сравнению с размерами неоднородностей и включений, превращают тело, состоящее из множества дискретных частиц, в *статистический макроскопический эквивалент*, доступный для математического анализа. Поскольку в большинстве процессов технологии взрывчатых веществ расстояния до границ (поверхностей) технологических объектов и загруженные площадки очень велики по сравнению с размерами отдельных частиц, представляется рациональным привлечь механику сплошной среды как основу для аналитического рассмотрения этих задач.

Первое допущение позволяет использовать классические представления и уравнения механики сплошных однофазных сред для описания процессов в масштабах самих неоднородностей – отдельных частиц, т.е. для дисперсной смеси в целом – это *микропроцессы* внутри или около отдельных включений или неоднородностей.

Второе допущение позволяет описывать *макроскопические процессы* в гетерогенной сыпучей смеси и пористом теле методами механики сплошных сред с помощью осредненных или макроскопических параметров.

4.2. Напряженно-деформированное состояние в точке

Компоненты напряжений и деформаций. Как известно, напряженно-деформированное состояние среды в данной точке определяется девятью компонентами напряжений и девятью компонентами деформаций на трех взаимно ортогональных площадках. Компонентами на-

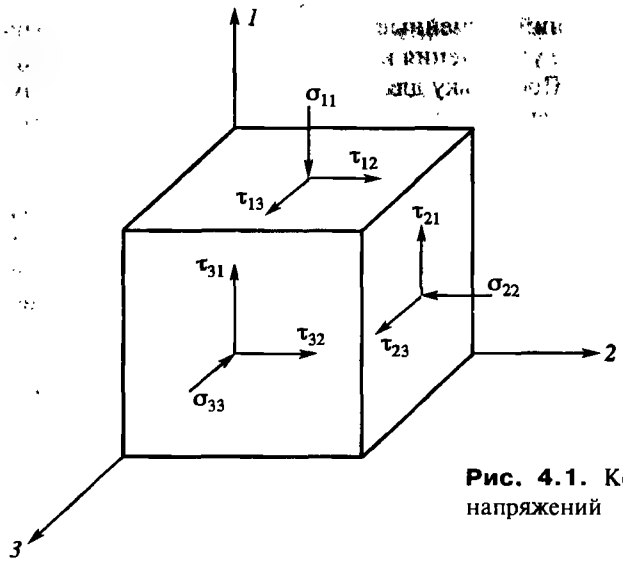


Рис. 4.1. Компоненты тензора напряжений

пряжений являются (рис .4.1) три нормальных напряжения σ_{11}, σ_{22}, σ_{33} и три пары взаимно равных касательных напряжений $\tau_{12} = \tau_{21}$, $\tau_{13} = \tau_{31}$, $\tau_{23} = \tau_{32}$ (в дальнейшем рассматривается *безмоментная* теория напряжений и деформаций).

Компонентами деформаций служат три линейные деформации (относительные удлинения или укорочения) ε_{11}, ε_{22}, ε_{33} и три пары взаимно равных угловых деформаций (относительных сдвигов): $\gamma_{12} = \gamma_{21}$, $\gamma_{13} = \gamma_{31}$, $\gamma_{23} = \gamma_{32}$. На рис. 4.2 показано деформированное состояние элементарного объема $dl_1 \cdot dl_2 \cdot dl_3$, вызванное воздействием нормальных

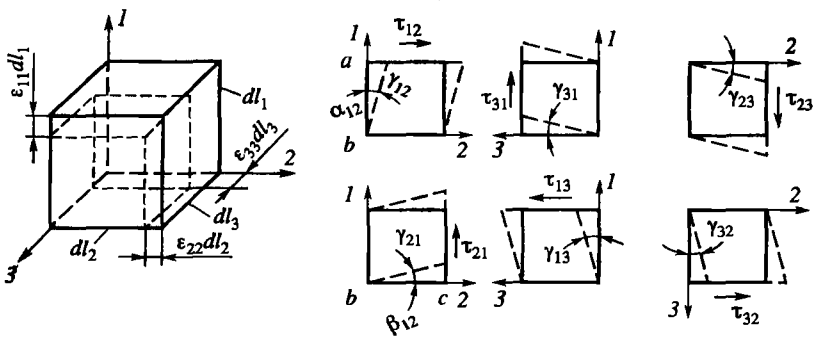


Рис. 4.2. Деформированное состояние элементарного макрообъема

и касательных напряжений. Линейные деформации ε_{11}, ε_{22}, ε_{33} характеризуют относительные укорочения или удлинения ребер элементарного параллелепипеда. Поскольку для большинства несвязных сыпучих сред характерно нулевое сопротивление растягивающему деформированию, то условимся положительными линейными деформациями считать укорочения, отрицательными – удлинения.

Относительные сдвиги $\gamma_{12} = \gamma_{21}$, $\gamma_{13} = \gamma_{31}$, $\gamma_{23} = \gamma_{32}$ характеризуют изменение углов между гранями элементарного параллелепипеда. Считается, что положительному сдвигу соответствует уменьшение угла между положительным направлением осей, а отрицательному – его увеличение.

Если U_1, U_2 , U_3 – смещения материала вдоль соответствующих осей прямоугольной системы координат, то малые деформации можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon_{11} = \partial U_1/\partial x_1,\ \varepsilon_{22} = \partial U_2/\partial x_2,\ \varepsilon_{33} = \partial U_3/\partial x_3;$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{21} = \partial U_1/\partial x_2 + \partial U_2/\partial x_1,\ \gamma_{13} = \gamma_{31} = \partial U_1/\partial x_3 + \partial U_3/\partial x_1,$$

$$\gamma_{23} = \gamma_{32} = \partial U_2/\partial x_3 + \partial U_3/\partial x_2.$$

Эти уравнения называются уравнениями *Коши*. Обычно в механике сплошных сред рассматриваются именно такие *малые деформации*, т.е. деформации, значительно меньшие единицы. Такая теория деформирования получила название *линейная теория деформирования*.

Областью применения линейной теории являются деформации *массивных тел* (сред), имеющих одинакового порядка протяженность во всех трех измерениях.

Из курса по сопротивлению материалов и других разделов механики сплошных сред известно, что через каждую точку тела можно провести по крайней мере три взаимно ортогональных площадки, на которых касательные напряжения равны нулю. Эти площадки называются *главными площадками*, а направления площадок (направление ортогональной к ним оси) – *главным направлением*.

Соответственно нормальные напряжения, действующие на этих площадках, называются *главными нормальными напряжениями* σ_1, σ_2, σ_3, а линейные деформации на аналогичных площадках, называются *главными линейными деформациями* ε_1, ε_2, ε_3. Главные напряжения имеют наибольшее и наименьшее значения из всех значений напряжений в данной точке, обычно их обозначают $\sigma_1 \geqslant \sigma_2 \geqslant \sigma_3$.

В механике сплошной среды широко применяют тензорный анализ, позволяющий записать соотношения между всеми компонентами напряжений и деформаций в более компактной форме.

Рассмотренное напряженное состояние в точке тела можно охарактеризовать матрицей

$$T_{н} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix}. \qquad (4.1)$$

Показатель $T_{н}$, записанный в виде такой матрицы, называют *тензором напряжений.*

В матрице нормальные напряжения расположены по диагонали, а одинаковые по величине касательные напряжения – симметрично этой диагонали. Поэтому тензор напряжений называется симметричным. В первой строке расположены все компоненты напряжений, имеющие направления, параллельные оси *1*, (см. рис. 4.1) во второй строке – параллельные оси *2* и в третьей строке – параллельные оси *3*. Кроме того, в первом столбце сгруппированы напряжения, действующие на площадке, нормаль к которой параллельна оси *1*, во втором столбце – все напряжения на площадке с нормалью, параллельной оси *2*, и в третьем столбце – на площадке с нормалью, параллельной оси *3*.

Все предыдущие рассуждения можно повторить для деформаций и скоростей деформаций. *Тензор деформаций* характеризуется матрицей

$$T_{д} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \varepsilon_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \varepsilon_{33} \end{vmatrix}. \qquad (4.2)$$

Аналогично выражается *тензор скоростей деформаций*:

$$T_{сд} = \begin{vmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} & \dot{\gamma}_{12} & \dot{\gamma}_{13} \\ \dot{\gamma}_{21} & \dot{\varepsilon}_{22} & \dot{\gamma}_{23} \\ \dot{\gamma}_{31} & \dot{\gamma}_{32} & \dot{\varepsilon}_{33} \end{vmatrix}. \qquad (4.3)$$

Скорости деформаций обозначены символами $\dot{\varepsilon}_{11}$, $\dot{\gamma}_{12}$, ... и т. д. Точка над символом означает дифференцирование по времени и соответственно: $\dot{\varepsilon}_{11} = d\varepsilon_{11}/dt$, $\dot{\gamma}_{12} = d\gamma_{12}/dt$, ... и т.д.

Напряженно-деформированное состояние в данной точке тела вполне определенно, если известны тензор напряжений и тензор деформаций или тензор скоростей деформаций.

Изменение объема. Если к элементарному параллелепипеду приложить три взаимно равных сжимающих напряжения, то параллелепипед будет находиться в условиях всестороннего сжатия $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33}$.

Касательные напряжения на любой из сторон параллелепипеда будут равны нулю. Приложенные нормальные напряжения вызовут относительное укорочение граней параллелепипеда: $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ (для изотропного материала). Если нормальные напряжения при указанных условиях будут растягивающими, то они вызовут соответствующее удлинение граней параллелепипеда.

Если первоначальный размер каждой грани параллелепипеда принять равным единице (рис. 4.3), то относительное изменение объема такого куба

$$\varepsilon_V = \Delta V/V = 1 - (1 \pm \varepsilon_{11})(1 \pm \varepsilon_{22})(1 \pm \varepsilon_{33}),$$

где ΔV – изменение первоначального объема куба $V = 1$.

Знак плюс соответствует удлинению граней, знак минус их укорочению.

Приведенное выражение после его развертывания и отбрасывания малых величин второго и третьего порядков примет вид

$$\varepsilon_V = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3.$$

Таким образом, три взаимно равных относительных укорочения (удлинения), обусловленных воздействием всестороннего сжатия (растяжения), вызывают объемную деформацию ε_V параллелепипеда, не изменяя его формы.

Изменение формы. Рассмотрим действие касательных напряжений и вызываемых ими угловых деформаций. При углах сдвига, малых по сравнению с единицей, можно считать, что ребра параллелепипеда не удлиняются и его деформация заключается только в скашивании и повороте. Такую деформацию, вызываемую действием пары взаимно равных касательных напряжений $\tau_{ij} = \tau_{ji}$ ($i, j = 1, 2, 3$; $i \neq j$), называют простым сдвигом.

Под действием напряжений, например $\tau_{12} = \tau_{21}$ произойдет скашивание параллелепипеда (см. рис. 4.2).

Угол поворота грани *ab* относительно вертикальной оси

$$\mathrm{tg}\alpha_{12} \approx \alpha_{12} = \partial U_1/\partial x_2,$$

а угол поворота грани *bc* относительно горизонтальной оси

$$\mathrm{tg}\beta_{12} \approx \beta_{12} = \partial U_2/\partial x_1.$$

Полный относительный сдвиг, т.е. искажение прямого угла *abc* (его уменьшение),

$$\gamma_{12} + \gamma_{21} = \alpha_{12} + \beta_{12} = \partial U_1/\partial x_2 + \partial U_2/\partial x_1.$$

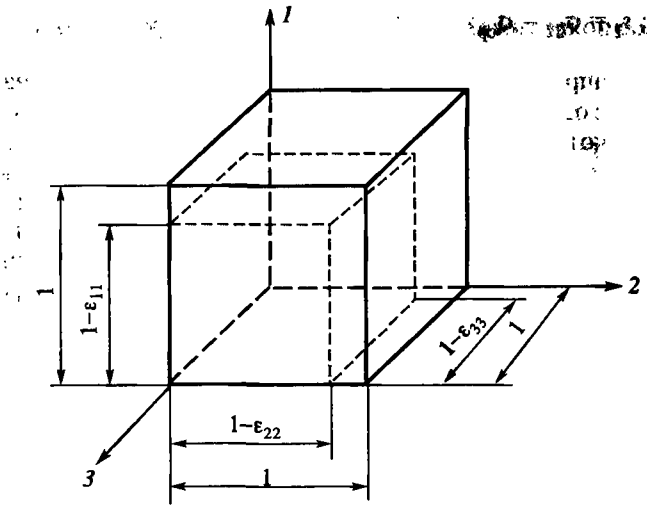


Рис. 4.3. Относительное изменение объема куба

Таким образом, деформация тела заключается в изменении формы, вызванном воздействием касательных напряжений, и в изменении объема под действием всестороннего давления.

Такое представление деформаций имеет важное значение при анализе закономерностей деформирования, поскольку эти виды деформаций могут описываться разными законами. Так, и у упругих, и у вязких тел объемная деформация прямо пропорциональна всестороннему давлению. Сопротивление же формоизменению у этих тел различное. У упругих тел их форма изменяется прямо пропорционально напряжению сдвига, вязкие же тела вообще не могут сохранять форму и сопротивляться сдвигу.

Разложение тензора напряжений. Напряженное состояние в точке можно представить в виде суммы двух напряженных состояний. Первое из них возникает под действием трех пар одинаковых нормальных напряжений, равных средним значениям

$$\sigma_{ср} = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3.$$

Показатель $\sigma_{ср}$, называемый *средним нормальным напряжением*, равен всестороннему (гидростатическому) давлению и вызывает изменение только объема. Вторая составляющая напряженного состояния вызывается касательными напряжениями $\tau_{12} = \tau_{21}$; $\tau_{13} = \tau_{31}$; $\tau_{23} = \tau_{32}$ и разностью между нормальными напряжениями и их средним значением:

$s_1 = \sigma_{11} - \sigma_{ср}$; $s_2 = \sigma_{22} - \sigma_{ср}$; $s_3 = \sigma_{33} - \sigma_{ср}$.

Таким образом, напряжения s_1, s_2, s_3 определяют, насколько данное напряженное состояние отклоняется от всестороннего равномерного сжатия или растяжения. Легко можно увидеть, что $s_1 + s_2 + s_3 = 0$. Это означает, что объемные деформации при втором напряженном состоянии равны нулю и воздействие напряжений s_1, s_2, s_3 приводит лишь к изменению формы.

Разложение тензора деформаций. Деформированное состояние элементарного объема можно представить в виде суммы двух деформированных состояний. Одно из них вызывается тремя парами одинаковых линейных деформаций со средними значениями

$$\varepsilon_{ср} = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})/3 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/3 = \varepsilon_V/3.$$

Показатель $\varepsilon_{ср}$ называют *средней линейной деформацией*. Очевидно, что форма элементарного параллелепипеда при воздействии $\varepsilon_{ср}$ не меняется, а показатель $\varepsilon_{ср}$ характеризует лишь объемную деформацию.

Второе деформированное состояние определяется угловыми деформациями $\gamma_{12} = \gamma_{21}$; $\gamma_{13} = \gamma_{31}$; $\gamma_{23} = \gamma_{32}$ и разностью линейных деформаций: $e_1 = \varepsilon_{11} - \varepsilon_{ср}$; $e_2 = \varepsilon_{22} - \varepsilon_{ср}$; $e_1 = \varepsilon_{11} - \varepsilon_{ср}$, определяющей, насколько данное деформированное состояние отклоняется от всестороннего равномерного сжатия или растяжения. Легко можно увидеть, что $e_1 + e_2 + e_3 = 0$.

Это означает, что при втором деформированном состоянии объем не изменяется, и деформации заключаются лишь в изменении формы.

Разложение тензора скоростей деформаций. Как и с тензором деформаций, аналогичную операцию разложения тензора на шаровую и девиаторную составляющие можно произвести и с тензором скоростей деформаций. Показатель $\dot{\varepsilon}_{ср} = (\dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33})/3 = (\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3)/3 = \dot{\varepsilon}_V/3$, называемая *средней скоростью линейной деформации*, характеризует скорость объемной деформации.

Показатели $\dot{\gamma}_{12} = \dot{\gamma}_{21}$; $\dot{\gamma}_{13} = \dot{\gamma}_{31}$; $\dot{\gamma}_{23} = \dot{\gamma}_{32}$; $\dot{e}_1 = \dot{\varepsilon}_{11} - \dot{\varepsilon}_{ср}$; $\dot{e}_2 = \dot{\varepsilon}_{22} - \dot{\varepsilon}_{ср}$; $\dot{e}_3 = \dot{\varepsilon}_{33} - \dot{\varepsilon}_{ср}$ определяют скорость деформаций формы.

4.3. Основные дифференциальные уравнения механики сплошных сред

Уравнение неразрывности. Уравнения неразрывности, переноса импульса, теплоты и вещества представляют собой математическую формулировку основных, фундаментальных понятий механики сплошных сред.

В дальнейшем эти известные уравнения приводятся без выводов и представлены в проекциях на оси прямоугольной системы координат. Уравнения неразрывности и переноса в цилиндрической и сферической системах координат представлены в [2].

В основе уравнения неразрывности **лежит закон сохранения** массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z)=0, \tag{4.4}$$

где ρ – плотность среды; t – время; (v_x, v_y, v_z) – компоненты вектора скорости в произвольной точке пространства.

Уравнение переноса импульса (уравнение движения сплошной среды). В основе этого уравнения лежит закон сохранения количества движения.

Проекция на ось x:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_x}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}=\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right)+g_x. \tag{4.5}$$

Проекция на ось y:

$$\frac{\partial v_y}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_y}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_y}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_y}{\partial z}=\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right)+g_y. \tag{4.6}$$

Проекция на ось z:

$$\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_z}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_z}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}=\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}\right)+g_z, \tag{4.7}$$

где (g_x, g_y, g_z) – проекции на соответствующие оси координат вектора ускорения свободного падения.

Уравнение переноса энергии (уравнение энергии). В основе этого уравнения лежит закон сохранения энергии:

$$\begin{aligned}&\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+v_x\frac{\partial T}{\partial x}+v_y\frac{\partial T}{\partial y}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)-\\&-T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_y}{\partial y}+\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)+\tau_{xx}\frac{\partial v_x}{\partial x}+\tau_{yy}\frac{\partial v_y}{\partial y}+\tau_{zz}\frac{\partial v_z}{\partial z}+\\&+\tau_{xy}\left(\frac{\partial v_x}{\partial y}+\frac{\partial v_y}{\partial x}\right)+\tau_{xz}\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial x}\right)+\tau_{yz}\left(\frac{\partial v_y}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial y}\right)+w_v,\end{aligned} \tag{4.8}$$

где c – удельная теплоемкость единицы массы при постоянном объеме; T – температура; λ – коэффициент теплопроводности (теплопроводность); w_v – удельная мощность источников тепла.

Уравнение переноса вещества (уравнение массопереноса). Если в непрерывном континууме осуществляется перенос вещества и происходит изменение концентрации отдельного (или каждого) компонента вещества в смеси в какой-либо точке технологического пространства в

произвольный момент времени, то уравнения неразрывности, переноса импульса, энергии используются совместно с уравнением переноса вещества (уравнением массопереноса)

$$\frac{\partial C}{\partial t}+v_x\frac{\partial C}{\partial x}+v_y\frac{\partial C}{\partial y}+v_z\frac{\partial C}{\partial z}=\beta\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right)+J_м, \qquad (4.9)$$

где C – концентрация вещества; β – коэффициент диффузии (диффузия); $J_м$ – удельная мощность источников вещества за счет химических превращений.

Как видно из приведенных дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса импульса, теплоты, вещества, имеется сходство в глобальных закономерностях и механизме самих процессов.

Необходимо отдельно подчеркнуть, что использование мощного аппарата дифференциального и интегрального исчисления, используемого в механике сплошных сред, непосредственно для процессов технологии взрывчатых веществ не представляется возможным. Это связано с тем, что в статистическом макроскопическом эквиваленте дисперсной смеси промышленных взрывчатых веществ не было принято никаких допущений или условий о соотношениях между нагрузками и деформациями. Чтобы отразить эти свойства, необходимо установить связь между шестью компонентами напряжений и шестью компонентами деформаций или их скоростями.

В общем виде эту связь можно записать в виде уравнений, устанавливающих связь между напряжениями и деформациями или скоростями деформаций. Такое уравнение (или система уравнений) называется *уравнением* (уравнениями) *состояния.*

В результате такого сочетания уравнения неразрывности, переноса импульса, энергии, вещества и уравнения состояния образуют замкнутую систему дифференциальных уравнений. Однозначное решение этих уравнений должно удовлетворять краевым (начальным и граничным) условиям, которые отделяют конкретный технологический объект исследования от множества ему подобных.

В зависимости от интересующих свойств уравнения состояния ПВВ могут быть определены теоретически или экспериментально в свете существующих знаний и представлений об их *физическо-механических свойствах* (см. разд. 2.6).

Литература

1. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч. I. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 464 с.

2. *Генералов М.Б.* Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: Учеб. пособие для вузов. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – 592 с.

ГЛАВА 5

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

5.1. Измельчение твердых тел [8, 10]

Общие понятия. Под измельчением твердых тел понимают процесс уменьшения их размеров при многократном воздействии внешних нагрузок. В результате этого процесса значительно увеличивается *поверхность контакта* измельчаемого твердого тела.

Основными способами измельчения являются *раздавливание, удар, разламывание, раскалывание, истирание* (соответственно рис. 5.1, *а–д*). В большинстве случаев эти воздействия осуществляются одновременно. Тем не менее часто из указанных способов измельчения основное значение имеет один из них, что обусловлено применяемой для измельчения конструкцией машины.

В зависимости от физико-механических свойств измельчаемого материала выбирают тот или иной метод механического воздействия:

Свойства материала	*Методы измельчения*
Прочный и хрупкий	Раздавливание, удар
Прочный и пластичный	Раздавливание
Хрупкий, средней прочности	Удар, раскалывание, истирание
Пластичный, средней прочности	Истирание, резание, раскалывание

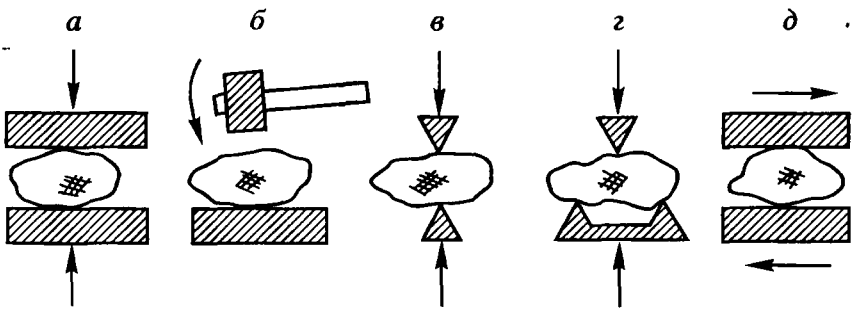


Рис. 5.1. Способы измельчения

На выбор метода измельчения большое влияние оказывают склонность материала к комкованию, его влажность и др. Например, измельчение твердых и хрупких материалов обычно проводят раздавливанием, раскалыванием и ударом; твердых и пластичных – раздавливанием и истиранием; мягких и пластичных – резанием.

Отношение значений удельной поверхности материала после (S) и до (S_0) измельчения называется *степенью* или *кратностью* измельчения: $i_S = S/S_0$.Так как на практике определить удельную поверхность достаточно сложно, часто за кратность измельчения принимают отношение характерных (усредненных) размеров куска, зерна или частицы до (D_c) и после (d_c) измельчения: $i = D_c/d_c$. При этом под характерным размером понимают размер кусков, соответствующих заранее фиксированному содержанию их в материале.

В зависимости от крупности исходного и измельченного материала различают дробление и измельчение. Под дроблением понимается процесс уменьшения крупности, в результате которого максимальный размер куска в измельченном материале условно равен 1–5 мм или больше. Под измельчением понимается процесс уменьшения крупности, в результате которого максимальный размер частицы в измельченном продукте условно менее 1–5 мм.

В свою очередь, процесс дробления делится на три стадии: крупное, среднее и мелкое, а процесс измельчения на четыре: крупное, среднее, тонкое и сверхтонкое (табл. 5.1).

Следует отметить, что строгих границ между указанными стадиями процессов дробления и измельчения не существует; они выбраны условно и в основном служат для ориентирования в выборе типа измельчающей машины. Хотя на практике применяют одни и те же размольные машины для получения твердого материала различной степени

Таблица 5.1

Стадии дробления и измельчения

Стадии	Максимальный размер куска (частицы), мм	
	до измельчения	после измельчения
Дробление:		
крупное	⩾500	100–400
среднее	100–500	20–100
мелкое	50–100	4–20
Измельчение:		
крупное	20–100	1–4
среднее	5–50	0,1–1,0
тонкое	1–10	0,01–0,1
сверхтонкое	0,1–1,0	<0,01

измельчения, а также получают одну и ту же степень измельчения твердого материала в разных размольных машинах.

Теория измельчения. Измельчение твердого материала является сложным процессом, зависящим от свойств перерабатываемого материала (его однородности, прочности, твердости, плотности, формы кусков или зерен, наличия в их объеме трещин и дислокаций, влажности и т.д.), а также от подбора соответствующих схемы измельчения и оборудования. Дробление и особенно измельчение являются весьма энергоемкими процессами, поэтому важно установить зависимость между затраченной работой и степенью измельчения материала. В связи с большой сложностью этой задачи до настоящего времени не получено ее исчерпывающее аналитическое решение, поскольку механизм разрушения твердых тел при дроблении практически не изучен.

В зависимости от изменений во времени силовые воздействия на твердое тело при измельчении могут считаться *статическими* (например, при измельчении раздавливанием в валковых дробилках) или *динамическими* (например, при ударном измельчении в роторных и молотковых дробилках).

Нагружение при измельчении будем считать статическим в том случае, если внешние силовые факторы, действующие на тело, не зависят от времени или изменяются в большие промежутки времени незначительно; при этом все тело находится в напряженно-деформированном состоянии.

Нагружение является динамическим, если действующие на тело внешние силовые факторы значительно изменяют свою величину по некоторым законам в короткие промежутки времени, измеряемые миллисекундами. Если внешние силовые факторы изменяют свою величину в промежутки времени, измеряемые микросекундами, то такое нагружение называется *импульсивным*. Возмущения при динамическом и импульсивном нагружениях распространяются с конечной скоростью; их интенсивность достаточна велика для того, чтобы произвести разрушение и большие необратимые изменения в теле, на которое они действуют.

В теле при динамическом и импульсивном нагружениях возникают возмущения различной природы (нагрузки, разгрузки, отражения и т.д.). Они распространяются с определенными конечными скоростями, которые зависят от физических свойств тела и характера деформаций, в виде *волн возмущений* (волн нагрузки, волн разгрузки, отраженных волн), называемых еще *волнами напряжений*.

Возмущения, распространяясь в теле, образуют области возмущений, которые расширяются с течением времени и ограничены частью поверхности тела и поверхностью фронта волны напряжений. Каждой области возмущений соответствует свое напряженно-деформирован-

ное состояние, характеризуемое тензором напряжений σ и тензором деформаций e и определяемое природой возмущения и свойствами тела.

В зависимости от вида и природы волн напряжений области возмущений разделяют на ***первичные*** и ***вторичные***. Первичной является область возмущений волны нагрузки *1* (рис. 5.2), так как в случае ее отсутствия не существуют волны разгрузки и отраженной волны. Области возмущений волны разгрузки и отраженных волн *2* будут вторичными, они всегда находятся внутри области возмущений волны нагрузки и являются областями с начальными напряжениями и деформациями.

Область возмущений волн нагрузки зарождается в окрестности непосредственного действия того или иного фактора или факторов воздействия: объемных (массовых) и поверхностных сил; температуры; облучения и др. С течением времени область возмущений расширяется с конечной скоростью, равной скорости распространения волн нагрузки c_0. Эта область ограничена частью поверхности тела, включая загруженную поверхность, и поверхностью фронта волны нагрузки.

Движение частиц тела характеризуется вектором скорости $\mathbf{v}_{\text{нагр}}$ и плотностью $\rho_{\text{нагр}}$, напряженно-деформированное состояние тела – тензором напряжений $\sigma_{\text{нагр}}$ и тензором деформаций $e_{\text{нагр}}$, компоненты которых являются функциями координат x_i ($i = 1, 2, 3$) и времени t. Состояние тела в области возмущений нагрузки зависит от физико-механических свойств материала и может быть упругим, пластичным, вязким, упругопластичным, вязко-упругим и другими и зависеть от природы возмущения и физико-механических свойств материала.

Волны напряжений различной природы, распространяясь в теле, взаимодействуют друг с другом, что приводит к образованию новых областей возмущений, перераспределению напряжений и деформаций и другим явлениям, характерным для динамического и импульсивного нагружений. При интерференции волн напряжений их интенсивности складываются и могут достигать значений, превосходящих предел прочности материала. В этом случае наступает разрушение. Разрушению способствуют различные дефекты (трещины, дислокации, внутренние остаточные напряжения, анизотропия прочностных свойств), которые могут возникать или существовать в куске или зерне твердого тела. Для оценки

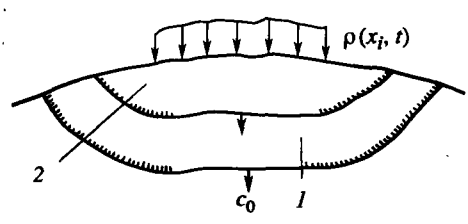


Рис. 5.2. Схема распространения волн напряжений

работы, необходимой для дробления материала с требуемой степенью измельчения при статических условиях нагружения, предложены несколько теоретических гипотез [1–5], основные из них рассмотрены далее.

Энергия, расходуемая на разрушение твердых тел рассчитывается следующим образом. Количество энергии, необходимое для измельчения твердых тел до определенного размера, зависит от размеров, формы, взаимного расположения кусков, прочности, хрупкости, однородности исходного материала, его влажности, вида и состояния рабочих поверхностей машины и т.д. Поэтому установить аналитическую зависимость между расходом энергии на измельчение, физико-механическими свойствами измельчаемого материала и условиями процесса измельчения можно лишь в приближенном и оценочном вариантах, хотя исследованием энергоемкости процесса измельчения занимаются давно.

Разрушение твердых тел при дроблении достигается за счет появления нормальных и касательных напряжений под действием внешних сил. Куски твердого материала подвергаются объемной деформации, а затем разрушению по ослабленным дефектами сечениям с образованием новых поверхностей.

В 1867 г. П. Риттингер впервые выдвинул гипотезу, что работа, расходуемая на измельчение материала, пропорциональна вновь образованной поверхности:

$$A_2 = k_1 \Delta S,$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, численно равный энергии, затрачиваемой на образование единицы вновь образованной поверхности твердого тела; ΔS – приращение поверхности твердого куска.

Вновь образованную поверхность ΔS можно выразить через начальные и конечные размеры дробимого материала, приняв, что этот материал до и после дробления состоит из кусков правильной кубической формы.

Если обозначить размер (длину ребра) исходного и конечного материалов соответственно через D и d, то при степени дробления куба $i = D/d$ вновь образованная поверхность

$$\Delta S = 6(i - 1)D^2.$$

Если дроблению подвергается не один кусок, а Q килограммов материала, и средний размер кусков материала равен D_c, то количество кусков, подлежащих дроблению, $Q/(\rho_м D_c^3)$. Так как работа дробления одного куска $A = 6k_1 D_c(i - 1)$, то работа дробления всех кусков

$$A = 6k_1 D_c^2 (i-1)\frac{Q}{\rho_м D_c^3} = K_R \frac{(i-1)Q}{D_c}, \qquad (5.1)$$

где $\rho_м$ – плотность материала; K_R – коэффициент пропорциональности; $K_R = 6k_1/\rho_м$.

В уравнение (5.1) входят параметры, которые характеризуют процесс измельчения и могут быть в каждом случае определены непосредственно или заданы: степень измельчения (дробления) i, средний размер куска исходного материала D_c, количество измельчаемого материала Q.

Коэффициент пропорциональности K_R между затраченной энергией и вновь образованной поверхностью определить трудно, что снижает практическое значение данной формулы.

В 1885 г. Ф. Кик на основании формулы для определения потенциальной энергии при деформировании материалов с упругими линейными свойствами

$$A = \frac{\sigma^2 V}{2E}, \qquad (5.2)$$

где σ – напряжение, возникающее при деформации материала; E – линейный модуль упругости, выдвинул гипотезу, что энергия, необходимая для одинакового изменения формы геометрически подобных и однородных твердых тел, пропорциональна объемам или массам этих тел.

Следует отметить, что В.Л. Кирпичев еще в 1874 г. предложил ту же зависимость, т.е. значительно раньше Ф. Кика, основываясь на том, что

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{Q_1}{Q_2},$$

где A_1 и A_2 – работа разрушения куска материала соответственно объемом V_1 или массой Q_1 и объемом V_2 или массой Q_2.

Поэтому вторая гипотеза разрушения называется гипотезой Кирпичева–Кика, согласно которой затрачиваемая работа, необходимая для измельчения куска материала, пропорциональна его объему. Согласно этой гипотезе работа измельчения одного куска размером D

$$A = k_2 D^3,$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности, который равняется работе разрушения единицы объема куска материала.

Работа измельчения материала массой Q со средним размером кусков D_c

$$A = k_2 D_c^3 \frac{Q}{\rho_м D_c^3}.$$

Если предположить, что общая степень измельчения $i = D_c/d_c$, достигается за n стадий дробления и в каждой стадии частная степень измельчения одинакова и равна r, то $i = r^n$.

Работа на всех стадиях измельчения одинаковая, а общая работа с учетом, что $n = \ln i/\ln r$,

$$A = k_2 D_c^3 \frac{Q}{\rho_м D_c^3} n = K_K Q \ln \frac{D_c}{d_c}. \qquad (5.3)$$

Здесь $K_K = \dfrac{k_2}{\rho_м \ln r}$.

По гипотезе Ф. Бонда (1950 г.), занимающей промежуточное место между гипотезами Кирпичева–Кика и Риттингера, работа, затрачиваемая в процессе разрушения твердого куска, пропорциональна приращению среднегеометрического между объемом и поверхностью:

$$A = k_3 D_c^{2,5} \frac{Q}{\rho_м D_c^3} n = K_B Q \left(\frac{\sqrt{i} - 1}{\sqrt{D_c}} \right), \qquad (5.4)$$

где k_3 – коэффициент пропорциональности; $D_c^{2,5}$ – размер куска материала после первого дробления; n – число стадий дробления; $n = \sqrt{i} - 1 /(\sqrt{r} - 1)$.

Здесь $K_B = \dfrac{k_3}{\rho_м \left(\sqrt{r} - 1\right)}$.

В 1954 г. А.К. Рундквист предложил работу дробления одного куска с определенной степенью измельчения представить в обобщенном виде:

$$A = k_4 D_c^m,$$

где k_4 – коэффициент пропорциональности; m – показатель степени, определяемый опытным путем, $2 \leqslant m \leqslant 3$ в зависимости от условий измельчения.

При $m = 2$ уравнение соответствует гипотезе Риттингера; при $m = 3$ гипотезе Кирпичева–Кика; при $m = 2,5$ – гипотезе Бонда.

Работа измельчения материала массой Q со средним размером кусков D_c

$$A = k_4 D_c^m \frac{Q}{\rho_м D_c^3} = k'_4 D_c^{m-3} Q \qquad (5.5)$$

при $k'_4 = k_4/\rho_м$.

Если степень измельчения r в каждой стадии дробления n остается неизменной, то средние размеры кусков, поступающие на последовательные стадии измельчения,

$$D_c, \frac{D_c}{r}, \frac{D_c}{r^2}, \frac{D_c}{r^3}, \ldots, \frac{D_c}{r^{n-1}}.$$

Согласно уравнению (5.5) работа измельчения материала на каждой стадии дробления

$$A_1 = k'_4 D_c^{m-3} Q, \; A_2 = k'_4 \left(\frac{D_c}{r}\right)^{m-3} Q, \; A_3 = k'_4 \left(\frac{D_c}{r^2}\right)^{m-3} Q, \ldots,$$

$$A_n = k'_4 \left(\frac{D_c}{r^{n-1}}\right)^{m-3} Q.$$

Общая работа измельчения

$$A = k'_4 D_c^{m-3} Q \left[1 + \frac{1}{r^{m-3}} + \left(\frac{1}{r^{m-3}}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{1}{r^{m-3}}\right)^{n-1}\right].$$

Определив сумму членов геометрической прогрессии (в квадратных скобках) со знаменателем $1/r^{m-3}$, для $m \neq 3$ получим:

$$A = k'_4 \frac{Q}{D^{3-m}} \frac{i^{3-m} - 1}{r^{3-m} - 1} = K_P Q \frac{i^{3-m} - 1}{D^{3-m}}, \qquad (5.6)$$

где $K_P = \dfrac{k'_4}{r^{3-m} - 1}$.

Уравнение (5.6) устанавливает зависимость работы измельчения от степени измельчения и крупности исходного материала. Полагая в уравнении (5.6) показатель $m = 2$, после несложных преобразований получим зависимость (5.1) для случая измельчения в области применения гипотезы Риттингена.

Таким образом, при измельчении материала определенной средней крупности (D_c = idem) с одинаковыми постоянными степенями измельчения на каждой стадии дробления (r = const) работа измельчения

пропорциональна степени измельчения минус единица. При дроблении материала различной степени крупности, но с одинаковой степенью измельчения работа измельчения обратно пропорциональна средней крупности исходного материала.

Эти выводы подтверждаются практикой измельчения: чем мельче исходный материал, тем больше расход энергии на его измельчение при постоянной степени измельчения.

Полагая в уравнении (5.6) показатель $m = 2{,}5$, получим зависимость (5.4) работы измельчения в области применения гипотезы Бонда.

Для случая, когда показатель $m = 3$, работу измельчения следует определять по уравнению (5.3) в области применения гипотезы Кирпичева–Кика.

В 1941 г. П.А. Рибиндер в соавторстве (Шнейдер, Жигач) предложили гипотезу, по которой удельная энергия $Э_{уд}$ при однократном разрушении твердого тела (энергия, отнесенная к объему тела), определяется следующим уравнением:

$$Э_{уд} = Э_1 + Э_2,$$

где $Э_1$ – затраты энергии на деформирование твердого тела до достижения в нем разрушающих напряжений, Дж/м^3; $Э_2$ – затраты энергии на создание новой поверхности при разрушении; $Э_2 = \sigma(S - S_0)$ (здесь σ – поверхностная энергия, Дж/м^2; S и S_0 – удельные поверхности тела соответственно после и до разрушения, м^2/м^3.

Если первоначальное тело, а затем его осколки подвергаются многократным доводящим до разрушения нагружениям, то суммарная удельная энергия

$$Э_{уд} = \sum_{i}^{n} Э_i + \sigma(S - S_0) \qquad (5.7)$$

при $\sigma = \text{const}$.

Здесь индекс i относится к i-му циклу нагружения из общего их числа n.

Энергия $Э_i$ деформирования упругого линейного тела в общем случае может быть выражена в виде

$$2Э_i = T_\sigma^n T_\varepsilon^n,$$

где T_σ^n, T_ε^n – предельные значения тензоров соответственно напряжений и деформаций в момент разрушения.

При одноосном растяжении-сжатии материалов, у которых линейные зависимости между напряжениями и деформациями сохраняются вплоть до разрушения,

$$\mathcal{Э}_i = \frac{\sigma_п^2}{2E},$$

где $\sigma_п$ – предел прочности материала.

Полагая, что предел прочности материала $\sigma_п$ и линейный модуль упругости E не зависят от размеров тела или его осколков, уравнение (5.7) можно представить в виде:

$$\mathcal{Э}_{уд} = n\frac{\sigma_п^2}{2E} + \sigma(S - S_0), \tag{5.8}$$

где n – число стадий нагружения (измельчения).

Увеличение поверхностной энергии тела при разрушении, определяемое вторым слагаемым в уравнении (5.8), в большинстве практически значимых случаев не превышает 2% общих теоретических затрат энергии на разрушение и в дальнейшем не будет учитываться.

В общем случае кратность измельчения при первом нагружении не равна таковой при последующих, даже если при каждом нагружении выполняется одинаковая работа. Обобщенная связь между числом нагружений, кратностью измельчения при первом нагружении r и общей кратностью измельчения i при n нагружениях описывается согласно гипотезе Рундквиста соотношением

$$n = \frac{i^{3-m} - 1}{r^{3-m} - 1}.$$

Показатель степени $(3 - m)$ устанавливает соответствие между числом нагружений и характером изменения размеров частиц твердого тела при каждом из них. Величина m зависит от условий измельчения, но не зависит от количества циклов нагружения n.

При сделанных допущениях энергия, расходуемая на измельчение кусков массой Q и плотностью материала кусков $\rho_м$,

$$\mathcal{Э} = \frac{\sigma_п^2 Q(i^{3-m} - 1)}{2E\rho_м(r^{3-m} - 1)}. \tag{5.9}$$

Уравнение (5.9) представим в следующем виде:

$$A = \begin{cases} J(i^{3-m} - 1), m \neq 3 \\ J_K \ln i, m = 3 \end{cases}. \tag{5.10}$$

Здесь $J = \dfrac{\sigma_п^2 Q}{2E\rho_м(r^{3-m} - 1)}$, $J_K = \dfrac{\sigma_п^2 Q}{2E\rho_м \ln r}$.

Из обобщенной зависимости (5.10) вытекают известные частные случаи.

1. По гипотезе Риттингера ($m = 2$) $K_R = J_R \dfrac{D_c}{Q} = \dfrac{\sigma_п^2 D_c}{2E\rho_м(r-1)}$.

2. По гипотезе Бонда ($m = 2{,}5$) $K_Б = J_Б \dfrac{\sqrt{D_c}}{Q} = \dfrac{\sigma_п^2 \sqrt{D_c}}{2E\rho_м(\sqrt{r}-1)}$.

3. По гипотезе Кирпичева–Кика ($m = 3$) $K_K = J_K \dfrac{1}{Q} = \dfrac{\sigma_п^2}{2E\rho_м \ln r}$.

4. По гипотезе Рундквиста (m = 3 $K_P = J_P \dfrac{D_c^{3-m}}{Q} = \dfrac{\sigma_п^2 D_c^{3-m}}{2E\rho_м(r^{3-m}-1)}$.

По данным работы [5] анализ промышленного использования измельчителей и специальные лабораторные исследования показывают, что в мельницах с периодической или непрерывной загрузкой, работающих в открытом цикле (без классификаторов), а также в молотковых, роторных, конусных и валковых дробилках процесс измельчения определяется гипотезой Риттингера ($m = 2$).

В мельницах сухого измельчения: шаровых барабанных, валковых и ширококольцевых среднеходовых, молотковых, работающих в замкнутых циклах с центробежными сепараторами (классификаторами) пыли, процесс измельчения протекает в соответствии с гипотезой Бонда или близким к нему при $m = 2{,}40 \div 2{,}65$ (прежде всего в зависимости от эффективности классификации: чем она выше, тем больше и значение m). В щековых дробилках процесс измельчения соответствует гипотезе Кирпичева–Кика ($m = 3$).

Производительность и мощность, расходуемая на измельчение твердых тел, рассчитываются следующим образом. Если производительность устройства для измельчения материала плотностью $\rho_м$ равна G, то мощность $N_{из}$, расходуемую на измельчение, с учетом формулы (5.10) найдем в виде

$$N_{из} = \frac{\sigma_п^2 G(i^{3-m}-1)}{2E\rho_м(r^{3-m}-1)},\ m \neq 3 \quad \text{и} \quad N_{из} = \frac{\sigma_п^2 G \ln i}{2E\rho_м \ln r},\ m = 3. \qquad (5.11)$$

Как видно из формул уравнения (5.11), расходуемая на измельчение мощность обусловлена свойствами материала ($\sigma_п$, E, $\rho_м$), производительностью G, исходной и конечной крупностью измельчения (D_c, d_c), характером процесса измельчения (параметром m). При этом, как уже упоминалось, m зависит только от типа измельчителя и технологической схемы измельчения.

Необходимо отметить, что уравнения (5.10) и (5.11) могут быть использованы только для сравнительной оценки процессов измельчения, так как включают неизвестный коэффициент m и степень измельчения r. Кроме того, напряженное состояние твердых тел при измельчении отличается от принятой в расчетах схемы одноосного нагружения материала в пределах зоны линейной упругости (в материале при измельчении могут независимо развиваться как упругая, так и пластическая и другие типы деформаций); при этом не учитывались специфические особенности конструкций машин.

По этим причинам на практике потребляемую дробилкой мощность при работе на определенном материале ориентировочно находят, исходя из опытных данных работы какой-либо другой дробилки по измельчению того же материала [1].

Например, если известны производительность $G_э$, потребляемая мощность $N_э$ и степень измельчения $i_э = D_{cэ}/d_{cэ}$ работающей (эталонной) дробилки, а также производительность G и степень измельчения $i = D_c/d_c$ предполагаемой к использованию дробилки, то потребляемую мощность N последней машины на основании применения гипотезы Риттингера и равенства КПД обеих машин можно рассчитать по уравнению

$$N = N_э \frac{G}{G_э} \frac{D_{cэ}}{D_c} \frac{i-1}{i_э - 1}. \qquad (5.12)$$

Исследования, проведенные во ВНИИстройдормаше [3] , показали, что если учесть дополнительные факторы, действующие в реальных условиях, то формула (5.6) может быть приведена к виду, необходимому для расчета мощности привода дробилок. Было установлено также, что применительно к процессу дробления показатель степени m в формуле (5.6) равен 2,5, что соответствует гипотезе дробления, предложенной Бондом.

Окончательная формула, выведенная во ВНИИстройдормаше, для определения установочной мощности электродвигателя дробилок:

$$N_{уст} = 0{,}13 E_i K_M G \frac{\sqrt{i}-1}{\sqrt{D_c}}, \qquad (5.13)$$

где E_i – затраты энергии, приходящиеся на 1 т материала при дроблении его от бесконечной крупности до размера, равного 1 мм, кВт·ч/т; K_M – коэффициент масштабного фактора, характеризующий изменение E_i исходного материала с изменением крупности; G – производитель, кг/с; i – степень дробления кусков материала; $i = D_c/d_c$.

Значение энергетического показателя E_i принимается по специальным таблицам в зависимости от вида материала.

Было бы правильно рассчитывать и поставлять двигатель дробилки в соответствии с конкретными условиями эксплуатации. Однако дробилки поставляются с универсальным приводом, обеспечивающим их работу в любых условиях, поэтому для расчета двигателя обычно принимается значение энергетического показателя $E_i = 8$ кВт·ч/т.

Значения коэффициента K_M (рис. 5.3) зависят от размера куска материала, подлежащего дроблению:

Средний размер исходного материала, мм	65	100	160	240	280	370	460
K_M	1,85	1,40	1,20	1,00	0,95	0,85	0,80

Формулу (5.13) можно использовать при расчете мощности привода дробильных машин, когда известны характеристика исходного материала и фактическая степень дробления.

Измельчающие устройства. По технологическому назначению машины для измельчения делятся на *дробилки* крупного, среднего и мелкого дробления и *мельницы* тонкого и сверхтонкого измельчения.

Приведенные в предыдущем подразделе способы разрушения материалов являются общими для процессов дробления и измельчения, которые различаются лишь технологическим назначением и местом в системе подготовки материалов. Условность размера граничного зерна измельченного материала, определяющего разницу между процессами дробления и измельчения (1–5 мм), приводит в ряде случаев к неопределенности в терминологии.

Если рассматривать устройства, разрушающие твердые тела механическими способами, то в дробилках между дробящими деталями машины всегда отсутствует непосредственный контакт. Постоянно имеющийся зазор заполняется материалом при работе под нагрузкой и остается свободным при работе на холостом ходу.

В мельницах измельчающие детали обычно отделены друг от друга слоем материала только под нагрузкой, а при работе на холостом ходу они непременно соприкасаются. Указанное различие отчасти объясняет относительно небольшое количество

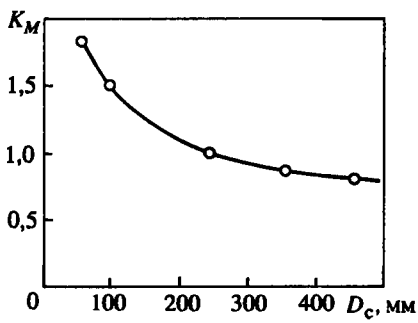


Рис. 5.3. Изменение коэффициента масштабного фактора в зависимости от размера куска материала

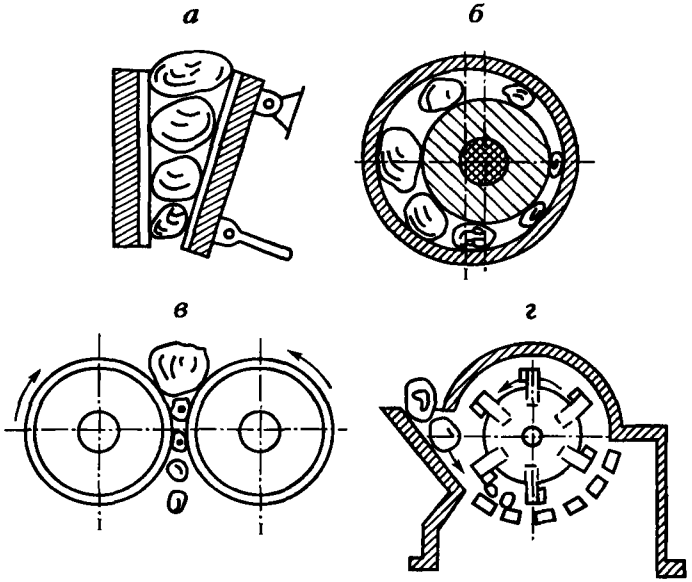


Рис. 5.4. Механические дробилки:
а – щековая; *б* – конусная; *в* – валковая; *г* – роторная или молотковая

мелочи в дробленом продукте и значительное содержание мелких классов в продуктах помола.

Наиболее общим признаком классификации дробильно-размольных устройств является способ разрушения тел – вид энергии, используемой для измельчения. Соответственно различают четыре основных типа дробильно-измельчительных машин и аппаратов: механические дробилки (рис. 5.4); механические мельницы (с мелющими телами, рис. 5.5); взрывные, пневматические, электрогидравлические, электроимпульсные, электротермические размольно-дробильные аппараты; аэродинамические и пневмомеханические мельницы (струйные аппараты без мелющих тел).

В производстве промышленных взрывчатых веществ в настоящее время употребляются почти исключительно механические дробилки (роторные и молотковые) и мельницы (барабанные и молотковые). Область применения отдельных конструктивных типов машин определяется прочностью размалываемого материала, требуемой производительностью и его гранулометрическим составом.

Поскольку в производстве ПВВ количество конструкций дробилок и мельниц ограничено, то машина одного и того же конструктивного типа может использоваться для грубого, среднего и тонкого дробления и измельчения. При этом в зависимости от требований к гранулометрическому составу измельченного продукта процесс дробления может

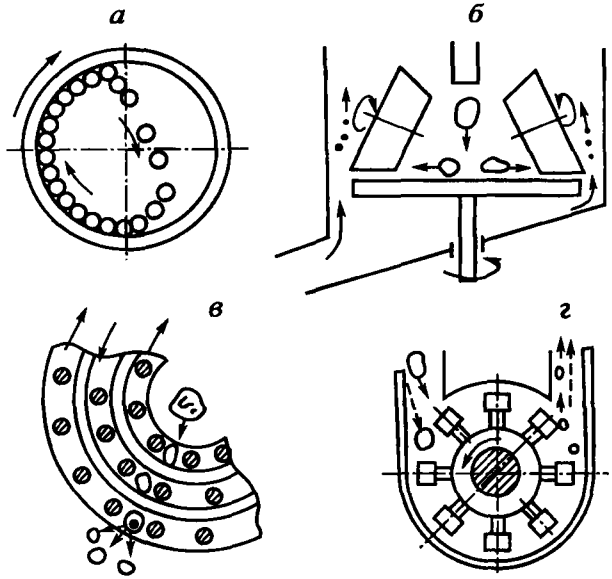


Рис. 5.5. Механические мельницы:
а – барабанная; *б* – волковая (бегуны); *в* – дезинтегратор (дискмембратор); *г* – роторная или молотковая

осуществляться как в одиночной машине, так и в каскаде одно- или разнотипных дробилок и мельниц в соответствии с принятой технологической схемой дробления и измельчения.

Технологические схемы дробления выбирают с учетом следующего. Процесс измельчения любых твердых материалов является одним из самых энергоемких в химической технологии, поэтому при выборе схемы дробления и оборудования необходимо соблюдать принцип: *не измельчать ничего лишнего*. По этому принципу из материала, подлежащего измельчению, целесообразно перед измельчающей машиной выделить (насколько это возможно) куски мельче того размера, до которого производится измельчение на данной стадии. Выделение «мелочи» часто осуществляется в процессе *ситовой классификации*, когда сыпучий материал разделяется на классы по крупности путем просеивания через одно или несколько сит. Классификация позволяет в значительной степени предотвратить попадание в измельчитель кусков материала, размер которых меньше или равен заданному наибольшему размеру кусков продукта, получаемого в данной дробилке или мельнице. При этом уменьшается расход энергии, становится возможным увеличение производительности измельчителя, а конечный продукт получается более равномерным по классам размеров. Уменьшается износ рабочих элементов дробилок и мельниц.

Оптимальные условия работы каждой из измельчающих машин в зависимости от ее устройства обеспечиваются при определенной степени измельчения, которая колеблется от $i = 1 \div 5$ для машин крупного измельчения до $i = 100$ и более для машин мелкого и тонкого измельчения.

Для получения высоких степеней измельчения прибегают к проведению процесса измельчения в несколько стадий на последовательно включенных машинах.

Материалы высокой и средней крепости обычно дробятся в две-три стадии, более мягкие – в одну стадию. Перед дробилками, выполняющими среднее и мелкое дробления, устанавливаются грохота или сита, если содержание готового класса крупности продукта составляет не менее 30%, а также материал является достаточно пластичным или увлажненным.

В производстве ПВВ применяются в основном одностадийные системы измельчения (рис. 5.6).

При измельчении в *открытом цикле* (рис. 5.6, *а*, *б*) материал проходит через измельчающую машину один раз. Открытая система (см. рис. 5.6, *а*) применяется при сравнительно крупном и среднем измельчении (ориентировочно $d = 10 \div 20$ мм), при этом гранулометрический состав измельченного продукта при прочих равных условиях однозначно определяется производительностью (загрузкой) мельницы. При наличии «мелочи» в исходном материале его предварительно классифицируют (см. рис. 5.6, *б*); при этом «мелочь» не подают в измельчитель, а сразу присоединяют к конечному продукту.

В *замкнутых циклах* с классификатором (грохотом) (рис. 5.6, *в*, *г*) материал неоднократно проходит через дробилку или мельницу. Измельченный продукт из измельчителя поступает в классификатор, выделяющий из него куски или зерна размером больше допустимого пре-

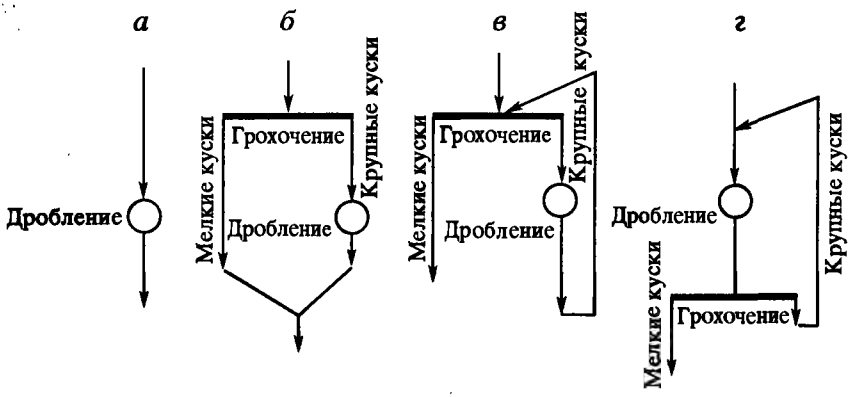


Рис. 5.6. Схемы циклов измельчения

дела, которые возвращаются в ту же дробилку или мельницу. Часто такую поверочную классификацию совмещают с предварительной классификацией исходного продукта (см. рис. 5.6, *в*).

Замкнутый цикл обычно используют при тонком измельчении. При осуществлении многостадийного размола измельчающая машина последней стадии обычно работает в замкнутом цикле. Крупность кусков или зерен готового продукта можно дополнительно регулировать с помощью грохота; при одинаковой крупности готового материала за счет уменьшения количества излишне измельченного продукта значительно повышается производительность системы, осуществляющей процесс «измельчение-классификация».

Молотковые и роторные дробилки относятся к машинам ударного действия и применяются в основном для среднего и мелкого дробления неабразивных материалов. Дробилки этого типа с шарнирно подвешенными на вращающемся роторе размольными органами – молотками или билами называются молотковыми, с жестко закрепленными билами – роторными.

Молотковые дробилки могут быть разделены на две группы: одно- и двухроторные. Последние изготавливаются в двух вариантах: с последовательным и параллельным дроблением.

Наиболее распространены однороторные молотковые дробилки, среди которых различают односторонние (нереверсивные) и реверсивные, а также с колосниковыми решетками и без них.

В реверсивных дробилках (рис. 5.7, *а*) степень использования металла молотков *3* выше, чем в нереверсивных (рис. 5.7, *б*), что позволяет примерно в 1,5 раза увеличить срок непрерывной работы дробилки. Колосниковая решетка ограничивает размеры крупных кусков в измельчаемом продукте. Дробилки без решеток используются при измельчении мягких, замазывающих ячейки решетки материалов.

Роторы молотковых дробилок состоят из вала *1*, насаженных на нем дисков *2*, разделяемых шайбами, и шарнирно укрепленных на дисках молотков *3*. Масса одного молотка составляет 3,5–150 кг. Легкие молотки (3,5–30 кг) применяются для исходной крупности 100–200 мм, средние (30–60 кг) – до 600 мм, тяжелые (60–150 кг) – соответственно для самых крупных кусков твердых материалов. Съемные колосниковые решетки снабжаются приспособлениями для регулирования зазора между ними и молотками.

Основные характеристики молотковых дробилок различных типов отечественного и зарубежного производства приведены в работах [3–6].

Роторные дробилки, как и молотковые, по конструктивным признакам отличаются: числом роторов (однороторные, имеющие наиболее широкое применение, и многороторные – двух- и трехроторные); способом выгрузки готового продукта (со свободной разгрузкой и с разгрузкой через колосниковую решетку).

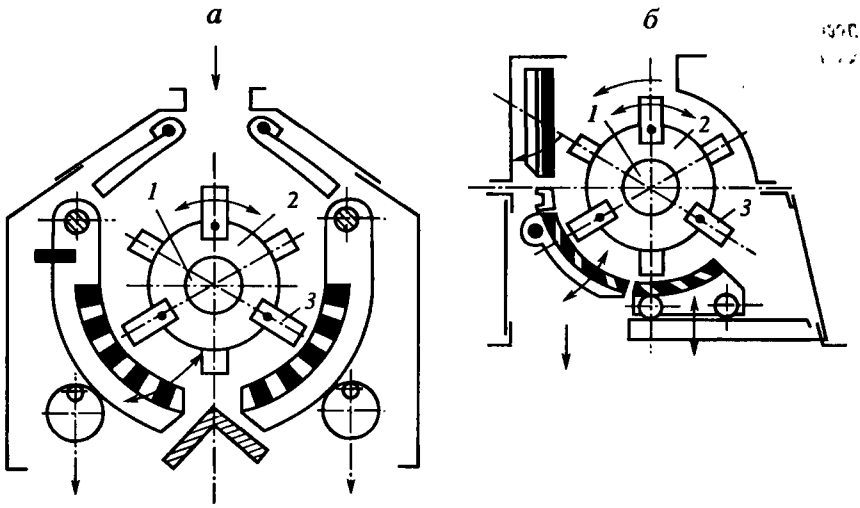


Рис. 5.7. Схемы молотковых реверсивных (*а*) и нереверсивных (*б*) дробилок

Роторные дробилки разделяются на три класса: крупного дробления, рассчитанные на прием кусков более 0,3 диаметра ротора; среднего дробления – 0,1–0,3 диаметра ротора; мелкого дробления – менее 0,1 диаметра ротора.

На вал роторной дробилки (рис. 5.8) насажан ротор *1* с билами *6*. Вал вращается в подшипниках, закрепленных в корпусе дробилки *2*. Верхняя часть корпуса имеет наклонную загрузочную воронку *3*, цепную шторку *4*, предупреждающую выброс материала из дробилки, и броневые отражающие плиты *5*, воспринимающие удары отлетающих от бил кусков измельченного материала.

Основные узлы роторных дробилок – ротор, отражательные плиты, корпус имеют различные конструктивные исполнения.

Углы установки плит следует выбирать: $\beta_1 = 15 \div 30°$; $\beta_2 = 55 \div 70°$ для дробилок крупного дробления и $\beta_1 = 0 \div 15°$; $\beta_2 = 40 \div 55°$ для дробилок мелкого дробления.

Размеры щелей (S_1 и S_2 в миллиметрах) должны соответствовать следующим отношениям: $S_{1min}/S_{1max} = 10/100 \div 20/200$ и $S_{2min}/S_{2max} = 10/63 \div 20/125$ для дробилок крупного дробления; $S_{1min}/S_{1max} = 8/100 \div 16/200$ и $S_{2min}/S_{2max} = 8/75 \div 16/150$ для дробилок среднего дробления.

Необходимое число бил, устанавливаемых на роторе, выражают условным числом бил $z_б$, определяемым через диаметр ротора $D_р$ и так называемый модуль ротора m_z:

$$z_б = \frac{D_р}{m_z}.$$

Модуль ротора зависит от назначения дробилки по крупности измельчения. Обычно у дробилок крупного дробления $m_z = 300 \div 500$ мм; у дробилок среднего и мелкого дробления $m_z = 170 \div 300$ мм. Расчетное значение $z_б$ обычно округляют до ближайшего четного числа, так как роторы с четным числом бил проще балансировать. Чтобы снизить влияние износа бил на производительность, их высоту делают в пределах $0{,}18D_р > h_б > 0{,}1D_р$. Толщины била b_0 и b определяются из условия минимальных износа и прочности.

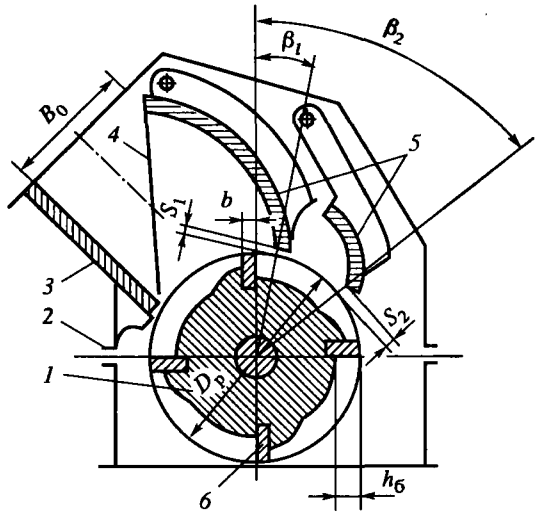


Рис. 5.8. Схема роторной дробилки

Зазор между билами и колосниковой решеткой

$$\delta_к = \frac{d_{max}}{1{,}5 \div 1{,}7},$$

где d_{max} — средний размер наибольшего куска (частицы) твердого измельчаемого материала.

Плоскость рабочей поверхности била чаще всего проходит через ось ротора, что обеспечивает прямой удар била по материалу.

При относительно слабых ударных нагрузках в случае мелкого измельчения наиболее рациональной формой ротора является цилиндр с выступающими билами (рис. 5.9, вариант I). При сильных ударных нагрузках в случае крупного дробления необходимо создание больших опорных поверхностей для бил (рис. 5.9, варианты II и III). Била имеют клиновые крепления, затягивающиеся под действием центробежной силы во время работы.

При работе дробилок наиболее интенсивно изнашивается передняя кромка била; она постепенно закругляется, и эффект удара снижается. Чтобы компенсировать эту потерю эффективности работы дробилок, часть рабочей поверхности била наклоняют по ходу вращения на 15 ÷ 20° (см. рис. 5.9, вариант II).

Необходимая окружная скорость ротора $v_р$ для получения кусков (частиц) размером не более d определяется по формуле [7]:

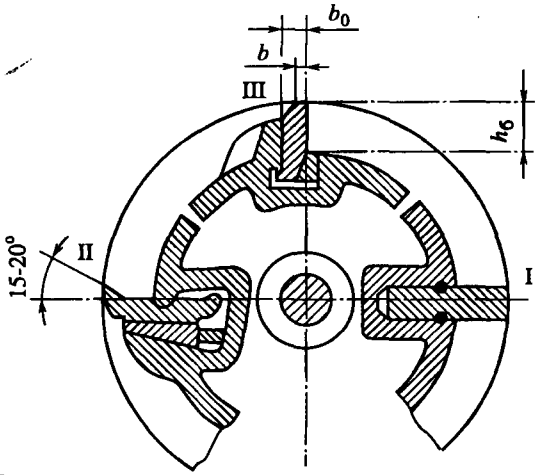


Рис. 5.9. Варианты крепления бил в роторе

$$v_р = 7{,}7\sqrt[3]{\left(9{,}8\frac{\sigma_{сж}}{\rho_м d}\right)^2},$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности при сжатии образцов измельчаемого материала неправильной формы, определенный на кусках (частицах) размером d, МПа; $\rho_м$ – плотность измельченного материала, г/см^3.

Для ориентировочного определения *производительности* Q (в метрах в секунду) роторных дробилок можно использовать эмпирическую формулу В.П. Барабашкина [3]:

$$Q = \frac{kL_р D_р^2 n^2}{216 \cdot 10^3 (i-1)},$$

где k – коэффициент, зависящий от конструкции дробилки и прочности дробимого материала; $k = 0{,}12 \div 0{,}22$; n – частота вращения ротора, с$^{-1}$; i – степень дробления.

Установочную мощность электродвигателя $N_{ус}$ (в киловаттах) роторных дробилок обычно определяют по опытным данным или рассчитывают по эмпирическим формулам, например по формуле (5.13) или формуле, предложенной В.А. Олевским [3]:

$$N_{ус} = 9D_р^2 L_р n,$$

где $L_р$ – длина ротора, м.

Дополнительные сведения, касающиеся расчета и конструирования роторных дробилок, а также технические характеристики роторных дробилок отечественного и зарубежного производства можно найти в работах [3, 7].

Роторные дробилки специального назначения предназначены для измельчения аммиачной селитры и других материалов, аналогичных ей по физико-химическим свойствам.

В производстве ПВВ используется дробильно-протирочный агрегат [8] (рис. 5.10), который включает корпус *1*, ротор дробления *5*, выполненный в виде полой разносторонней призмы. На боковых гранях ротора смонтированы зубья и зубчатые секторы. На общем валу привода *2* также установлен ротор протирания *3*, под которым крепится съемное сито *4*. Все узлы агрегата крепятся на общей раме *6*.

Материал в виде кусков поступает в роторную дробилку через загрузочное устройство *Б*; по мере измельчения он перемещается в ротор протирания и выходит через выгрузное устройство *В*.

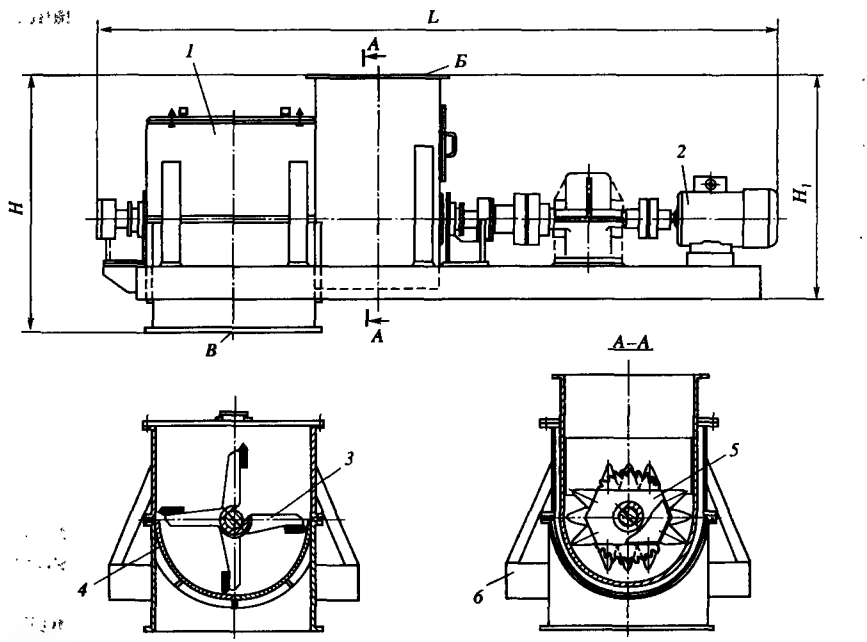


Рис. 5.10. Схема дробильно-протирочного агрегата

Техническая характеристика агрегата:

Производительность, кг/ч	1500
Размер кусков исходного материала, мм	до 500
Размер частиц измельчения мм, не более	5
Частота вращения ротора, мин$^{-1}$	36
Мощность электродвигателя, кВт	5,5
Масса, кг	1200

Барабанные мельницы обеспечивают измельчение материала внутри полого вращающегося барабана. При вращении барабана с определенной угловой частотой *мелющие тела* (шары, стержни и др.) и измельчаемый материал начинают двигаться вместе с корпусом барабана, поднимаются на некоторую высоту и затем падают вниз. Материал измельчается под действием удара, а также за счет раздавливания и истирания при перекатывании мелющих тел. Увеличивая время пребывания материала в мельнице, можно получить очень высокую степень измельчения, однако при этом резко возрастает расход энергии.

Барабанные мельницы классифицируют:

по режиму работы – периодического (рис. 5.11, *а*) и непрерывного (рис. 5.11, *б–д*) действия;

по способу помола – сухого и мокрого помолов;

по характеру работы – работающие по открытому и замкнутому циклам;

по форме мелющих тел – шаровые, стержневые и самоизмельчения (без мелющих тел);

по способу разгрузки – с механической и пневматической разгрузкой;

по конструкции загрузочного и разгрузочного устройства – с загрузкой и выгрузкой через люк (см. рис. 5.11, *а*), с загрузкой и выгрузкой через полые цапфы (рис. 5.11, *б*, *г–е*), с периферийной разгрузкой (рис. 5.11, *в*);

по конструкции привода – с центральным (рис. 5.11, *ж*) и периферийным (рис. 5.11, *е*) приводами.

Барабанные мельницы сравнительно просты по конструкции и удобны в эксплуатации. Однако они имеют существенные недостатки: малые скорости воздействия мелющих тел на материал, в работе участвует только часть мелющих тел, рабочий объем барабана используется только на 35–45%, расход энергии составляет 35–40 кВт·ч/т; в отдельных случаях при помоле прочных материалов эта величина может быть в 5–10 раз больше.

Типоразмер барабанных мельниц определяется внутренним диаметром D и длиной L его цилиндрической части. В зависимости от формы барабана мельницы могут быть цилиндроконические ($L < D$ –

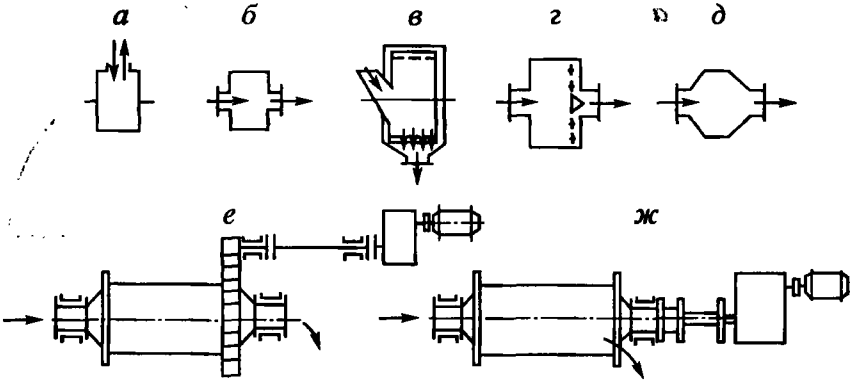


Рис. 5.11. Основные схемы барабанных мельниц

рис. 5.12, *а*), цилиндрические короткие ($L/D < 1$ – рис. 5.12, *б*), цилиндрические длинные ($1 \leqslant L/D < 3$) и трубные ($L/D \geqslant 3$ – рис. 5.12, *в*). Трубные мельницы обычно имеют несколько камер по длине, на которые они делятся внутренними перегородками.

В производстве ПВВ для измельчения бризантных взрывчатых веществ преимущественное применение имеют цилиндрические короткие мельницы периодического и непрерывного действия с шаровыми мелющими телами и без них (мельницы с самоизмельчением). Внутренняя поверхность барабана имеет деревянную футеровку; материал измельчающих шаров – дерево, фарфор или полимеры.

Режим работы барабанных мельниц характеризуется следующим. Характер движения мелющих тел во вращающемся барабане зависит от его угловой частоты вращения ω. При небольшой частоте вращения мелющие тела, например шары, увлекаются барабаном в сторону его вращения (рис. 5.13, *а*), поднимаются и затем скатываются параллельными слоями вниз. Такой режим движения шаров называется *каскадным*. Материал, находящийся при этом в барабане, измельчается раздавливанием и истиранием при перекатывании шаров.

При большой частоте вращения барабана (рис. 5.13, *б*) каждый шар в верхней зоне отрывается от слоя или стенки барабана и свободно па-

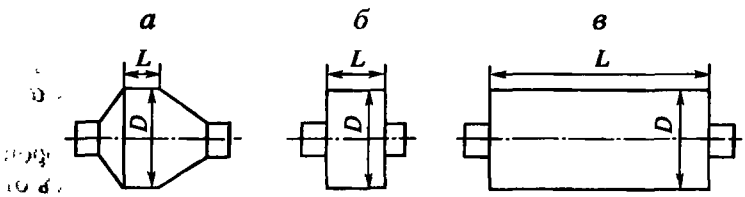


Рис. 5.12. Корпуса барабанных мельниц

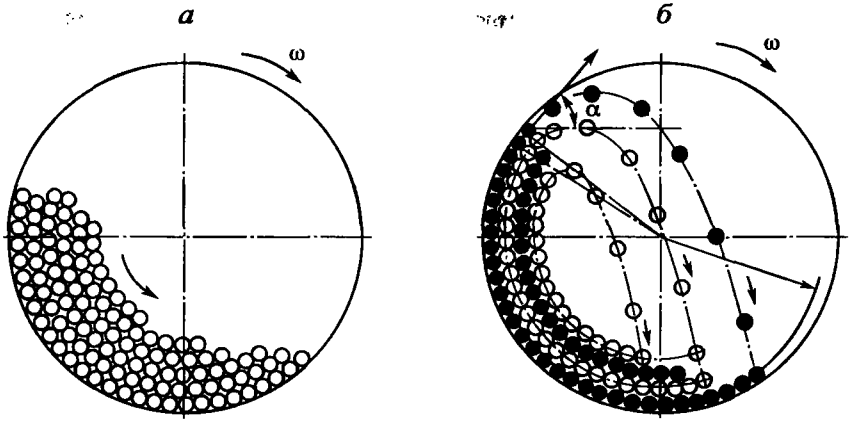


Рис. 5.13. Режимы работы барабанных мельниц

дает по параболической траектории, возвращаясь в слой шаров и материала с ударом (на рисунке шары соседних слоев для наглядности показаны светлыми и темными). Этот режим движения шаров называется *водопадным*. При этом режиме материал измельчается более эффективно, чем в предыдущем случае, что обусловлено воздействием удара, а также, частично, раздавливанием и истиранием.

Для приближенного определения условий отрыва и свободного движения шара массой m_1 его рассматривают как материальную точку, на которую действуют лишь массовые силы (тяжести и центробежного поля). Отрыв шара в некоторой точке А (рис. 5.14) от цилиндрической стенки барабана радиусом R происходит при условии:

$$mg\cos\alpha \geqslant P_{ц},$$

где α – угол наклона вектора окружной скорости шара $v_к$ горизонту; $P_ц$ – центробежная сила, действующая на шар; $P_ц = m\omega^2$.

Следовательно, условие отрыва и свободного падения, которое можно получить из уравнения $mg\cos\alpha \geqslant m\omega^2 R$, имеет вид:

$$\omega \leq \sqrt{\frac{g\cos\alpha}{R}},$$

при этом угол отрыва шара должен удовлетворять условию $0 < \alpha \leqslant \leqslant \pi/2$.

Критическая угловая частота вращения барабана $\omega_{кр}$, при которой мелющий шар проходит верхнее положение ($\alpha = 0$), не отрываясь от корпуса барабана,

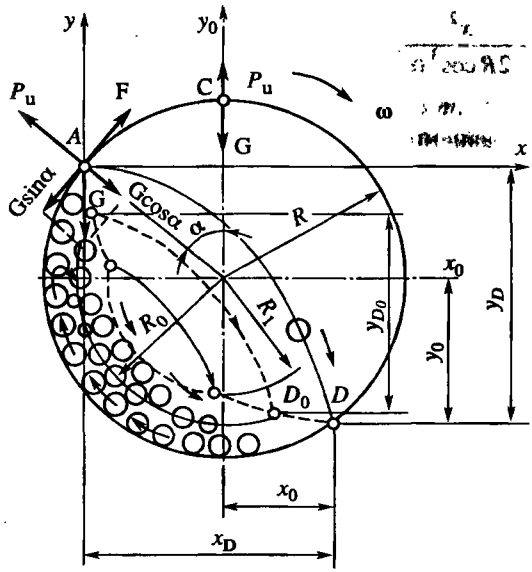


Рис. 5.14. Схема к расчету угловой частоты вращения барабана мельницы

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{3{,}13}{\sqrt{R}}. \qquad (5.14)$$

В барабанных мельницах угловая частота вращения барабана обычно составляет $\omega = (0{,}3 \div 0{,}8)\omega_{кр}$.

Существует оптимальные угол отрыва и частота вращения барабана, при которых максимальны высота падения шара и, следовательно, его кинетическая энергия в момент удара. В системе координат $x - y$ (см. рис. 5.14) высота падения шара определяется ординатой y_D в точке соприкосновения шара со слоем после падения.

Траектория движения шара при свободном падении при условии, что начальная скорость шара v направлена под углом α к горизонтали, представляет собой параболу. Уравнение траектории в параметрическом виде будет:

$$x = v/\cos\alpha, \quad y = v\,t\sin\alpha - gt^2/2,$$

где t – время, отсчитываемое с момента отрыва шара.

Поскольку $v = \omega R = \sqrt{Rg\cos\alpha}$, уравнение траектории

$$y = x\mathrm{tg}\alpha - \frac{x^2}{2R\cos^3\alpha}. \qquad (5.15)$$

С учетом уравнения (5.15) координаты точки D на окружности барабана

$$y_D = -4R\sin^2\alpha\cos\alpha;\ x_D = 4R\sin\alpha\cos^2\alpha. \qquad (5.16)$$

Для определения $y_{D\max}$ следует в первом выражении уравнения (5.16) первую производную приравнять к нулю и найти оптимальный угол $\alpha_{оп}$

$$\frac{dy_D}{d\alpha} = -8R\sin\alpha\cos^2\alpha + 4R\sin^3\alpha = 0,$$

откуда $\mathrm{tg}\,\alpha_{оп} = \sqrt{2}$ и $\alpha_{оп} = 54°40'$.

Следовательно,

$$\omega_{оп} = \sqrt{\frac{g\cos\alpha_{оп}}{R}} = \frac{2,38}{\sqrt{R}} \text{ или } \omega_{оп} = 0,76\omega_{кр}. \qquad (5.17)$$

Такое соотношение между $\omega_{оп}$ и $\omega_{кр}$ практически соответствует значениям, выявленным при эксплуатации барабанных мельниц [6].

Производительность барабанных мельниц зависит от многих факторов, некоторые из которых трудно поддаются учету. По этой причине производительность шаровых мельниц Q рассчитывают по эмпирическим уравнениям применительно к определенным продуктам измельчения:

$$Q = 6,45V\sqrt{D}\,(m_з/V)^{0,8}qk,$$

где V – рабочий объем барабана, м^3; D – внутренний диаметр барабана, м; $m_з$ – масса загрузки; $m_з = m_1 + m_2$ (здесь m_1 – масса мелющих тел; m_2 – масса измельчаемого материала), т; q – удельная производительность мельницы; для клинкера $q = 0,03 \div 0,04$ т/(кВт·ч); k – поправочный коэффициент, учитывающий степень помола; $k = 0,6 \div 1,0$ для среднего помола.

Эту формулу используют для оценочных расчетов и в других отраслях промышленности.

Установочная мощность электродвигателя (в киловаттах) привода шаровых барабанных мельниц для оценочных расчетов рассчитывается по следующему уравнению [3]:

$$N_{yc} = \frac{0,39 m_з R \omega g}{1000\eta}.$$

Массу загрузки $m_з$ равную сумме масс шаров m_1 и измельчаемого материала m_2, обычно принимают равной 14% массы мелющих тел, следовательно:

$$m_з = 1,14 m_1 = 1,14 \pi R^2 L \rho_1 \mu \varphi_з,$$

где ρ_1 – плотность материала шаров; μ – коэффициент неплотности загрузки; для шаров $\mu = 0,57$; $\varphi_з$ – коэффициент заполнения барабана; $\varphi_з = 0,3$.

При центральном приводе коэффициент полезного действия $\eta = 0,9 \div 0,94$; при периферийном приводе $\eta = 0,85 \div 0,88$. Установочную мощность двигателя принимают на 10 ÷ 15% больше расчетной, принимая во внимание необходимость преодоления инерционного момента при пуске мельницы.

Вибрационные мельницы обеспечивают измельчение материала при высокочастотном ударе и истирании со стороны мелющих тел.

По способу возбуждения колебаний вибрационные мельницы разделяют на *гирационные (эксцентриковые)* и *инерционные.*

Вибрационная мельница гирационного типа (рис. 5.15, *а*) состоит из электродвигателя *1*, соединенного через муфту *2* с коленчатым валом *3*, на котором эксцентрично на подшипниках установлен корпус *4* мельницы. Корпус опирается на пружины *7* и заполнен мелющими шарами *5* с коэффициентом заполнения $\varphi_з = 0,8 \div 0,9$. При вращении вала (угловая частота вращения 150–300 $с^{-1}$) корпус совершает круговые колебания в вертикальной плоскости. При таких колебаниях корпуса шары начинают с соударениями циркулировать в сторону, обратную вращению вала. При колебаниях шаров происходят спонтанные

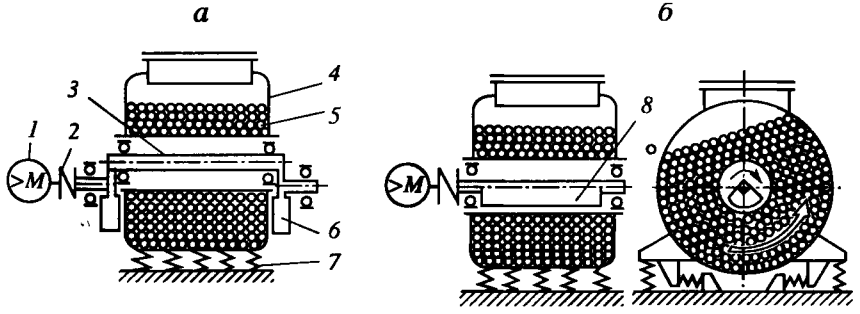


Рис. 5.15. Схемы вибрационных мельниц гирационного (*а*) и инерционного (*б*) типов

отрывы их от корпуса, а при возобновлении контактов направление ударного импульса со стороны корпуса определяет упомянутый характер движения шаров. Инерционные силы колеблющегося корпуса уравновешиваются двумя противовесами *6*. Амплитуда колебаний корпуса мельницы постоянная и равняется удвоенному размеру эксцентриситета приводного вала.

Вибрационные мельницы инерционного типа (рис. 5.15, *б*) нашли более широкое применение, чем мельницы гирационного типа, из-за простоты своей конструкции. Колебания корпуса обеспечивает вал с дебалансной массой *8*. Амплитуда колебаний корпуса мельницы зависит от жесткости пружин и сил инерции неуравновешенных масс; частота колебаний определяется угловой частотой вращения вала, соединенного с электродвигателем.

Инерционная вибрационная мельница типичной конструкции (рис. 5.16) состоит из корпуса *1*, в котором на подшипниках *3* установлен дебалансный вал *2*, приводимый во вращение двигателем *4*. Корпус мельницы опирается на пружины *5*. При вращении вала корпус мельницы с загруженными мелющими телами и материалом вибрирует с высокой частотой. Вследствие этого мелющие тела интенсивно воздействуют на материал и измельчают его. В процессе работы мельницы мелющие тела медленно поворачиваются в сторону, противоположную направлению вращения дебалансного вала.

Техническая характеристика инерционных вибрационных мельниц

	М–50	М–200	М–230	М–400
Объем корпуса, $м^3$	0,05	0,20	0,23	0,40
Частота колебаний, $с^{-1}$	50	25	25	25
Амплитуда колебаний, мм	4	3	4	3,5
Мощность двигателя, кВт	10	14	23	28
Производительность при сухом помоле клинкера до частиц 20–40 мкм, т/ч	0,1–0,2	0,3–0,6	0,5–0,8	1,2–2,0

Основные параметры вибрационных мельниц рассчитываются следующим образом. Амплитуда колебаний инерционной мельницы зависит от жесткости пружин и сил инерции неуравновешенных масс. Ее значение определяют из рассмотрения колебательного движения центра масс корпуса мельницы (рис. 5.17). Вынуждающей силой является центробежная сила дебаланса, модуль которой

$$P = m_д \omega^2 R,$$

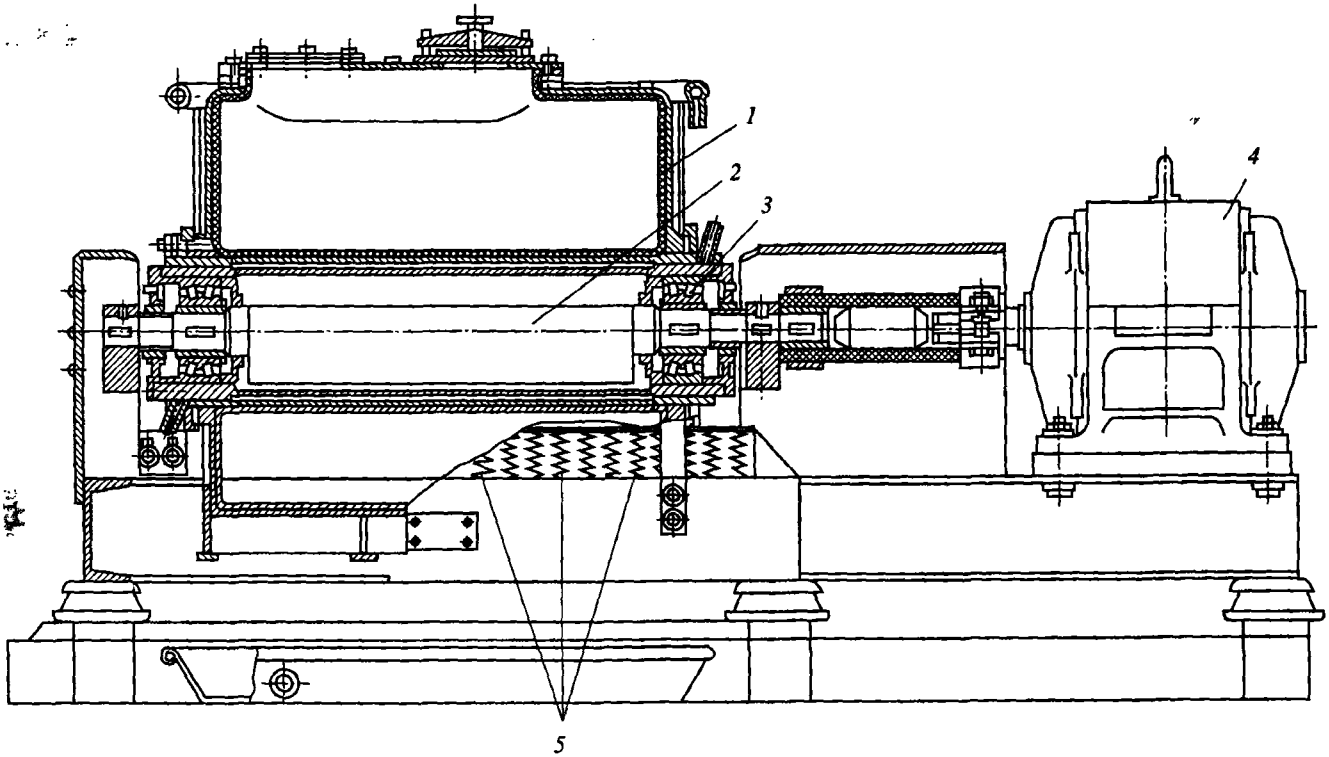


Рис. 5.16. Инерционная вибрационная мельница

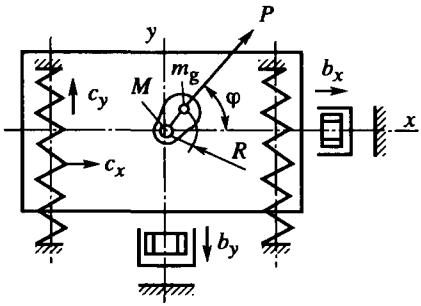


Рис. 5.17. Схема к расчету параметров инерционных вибрационных мельниц

где $m_д$ – масса дебаланса; ω – угловая частота вращения дебаланса; R – расстояние от оси вращения до центра масс дебаланса.

В предположении, что центр масс корпуса совпадает с осью вращения дебалансного вала и коэффициенты жесткости пружин (c_x и c_y) и сопротивления диссипативных сил (b_x и b_y) в направлении выбранных осей x и y известны, уравнения вынужденных колебаний центра масс запишутся так:

$$M\ddot{x} + b_x\dot{x} + c_x x = m_д\omega^2 R\cos\omega t;$$
$$M\ddot{y} + b_y\dot{y} + c_y y = m_д\omega^2 R\sin\omega t,$$

где M – масса колеблющейся системы, включая массу корпуса, материала и вибратора; x и y – координаты колеблющегося центра масс относительно положения равновесия; точки над символами координат соответствуют второй и первой производным по времени, т.е. ускорениям и скоростям.

Решениями дифференциальных уравнений для установившегося режима колебаний будут

$$x = x_A\cos(\omega t - \varphi_x);$$

$$y = y_A\sin(\omega t - \varphi_y),$$

где φ_x и φ_y – начальные фазы колебаний по соответствующим координатам.

Амплитудные значения перемещений системы

$$x_A = \frac{m_д\omega^2 R}{\sqrt{(c_x - M\omega^2)^2 - b_x^2\omega^2}};$$

$$y_A = \frac{m_д\omega^2 R}{\sqrt{(c_y - M\omega^2)^2 - b_y^2\omega^2}}.$$

Начальные фазы колебаний

$$\varphi_x = \operatorname{arctg}\frac{b_x\omega}{\omega_0^2 - \omega^2};\ \varphi_y = \operatorname{arctg}\frac{b_y\omega}{\omega_0^2 - \omega^2},$$

где ω_0 – собственная частота колебаний системы, $с^{-1}$.

Обычно $c = c_x = c_y$, и сопротивление диссипативных сил (сопротивление воздуха, трение в опорных узлах и т.д.) составляет менее 10% общих сопротивлений и для упрощенных расчетов ими можно пренебречь, т.е. $b_x = b_y = 0$. Учитывая это, а также, что $c = M\omega_0^2$, получим амплитуду колебаний

$$A = \frac{m_д \omega^2 R}{M\left|\omega_0^2 - \omega^2\right|}.$$

Вибрационные мельницы обычно работают в зарезонансном режиме, поэтому жесткость пружин выбирают так, чтобы частота вынужденных колебаний в 4–5 раз превышала собственную частоту колебаний, т.е. $\omega/\omega_0 = 4 \div 5$. На практике амплитуду и частоту колебаний задают из условий проведения технологического процесса измельчения, а определяют дебалансную массу из условия $m_д R = AM$.

Мощность электродвигателя привода вибратора $N_{дв}$ складывается из мощности, расходуемой на колебания вибрационной системы $N_к$, и мощности $N_{тр}$ на преодоление трения в подшипниковых опорах:

$$N_{дв} = (N_к + N_{тр})/\eta,$$

где η – КПД привода.

Значение $N_к$ может быть оценено по максимальному значению средней мощности, необходимой для поддержания вынужденных колебаний линейной упругой системы с одной степенью свободы. В этом случае

$$N_к = \frac{P^2 \omega}{4M\left|\omega_0^2 - \omega^2\right|}.$$

Мощность, затрачиваемая на трение в подшипниковых опорах:

$$N_{тр} = f_{тр} D_п m_д \omega^3 R,$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения в подшипниках вибратора; $D_п$ – диаметр подшипника.

В качестве примера на рис. 5.18 представлена схема установки с вибрационной мельницей непрерывного действия. Материал из бункера *3* ячейковым питателем *4* подается в мельницу *1*. В верхней части мельницы воздуходувкой (вентилятором) *9* по трубе *10* нагнетается воздух, который выносит мелкие частицы в сепаратор *6*. Выделенные в сепараторе крупные частицы снова возвращаются по желобам *5* и *11* в мельницу на дополнительное измельчение. Мелкие частицы вместе с

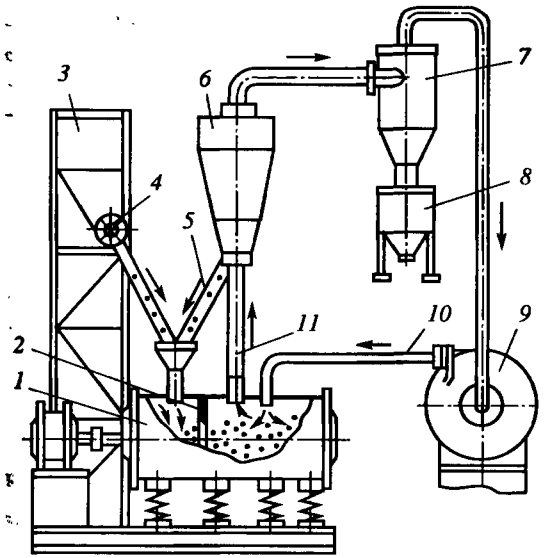


Рис. 5.18. Схема помольной установки с вибрационной мельницей непрерывного действия

отходящим воздухом поступают в циклон *7*, где они выпадают из потока и осаждаются в приемнике *8*. Очищенный в циклоне воздух поступает в вентилятор. Приемная часть барабана мельницы отделена от зоны продувки диафрагмой *2*. Управление установкой автоматизированное и предусматривает при пуске двигателя мельницы опережающий пуск питателя, вентилятора, насосов смазывания и охлаждения [3].

В [9] приводятся сведения о принципах действия, конструкциях, технических характеристиках и методах расчета вибрационных возбудителей электромагнитного, пневматического и гидродинамического типов, которые также могут использоваться в вибрационных машинах различного назначения.

Мельницы ударного действия обеспечивают разрушение материала высокоскоростным ударом частиц о рабочие органы или одну о другую. Их отличает компактность конструкции, относительно малая металлоемкость, возможность получения тонкодисперсных порошков при относительно малых энергетических затратах. Общим недостатком мельниц этой группы является быстрый абразивный износ мелющих органов. Поэтому мельницы ударного действия применяются в основном для помола материалов малой и средней прочности.

По способу подвода энергии к материалу эти мельницы можно разделить на механические и пневматические (струйные). Известно большое количество механических ударных мельниц, но наиболее употребительны дезинтеграторы, дисмембраторы, ударно-отражательные мельницы в малотоннажных технологиях и молотковые мельницы — в крупнотоннажных.

Для малотоннажных производств в нашей стране серийно изготовляются *дисмембраторы и дезинтеграторы.*

В дисмембраторе (рис. 5.19) вращается один диск *2*, а второй диск *1* неподвижный. Различают дисмембраторы с вертикальным и горизонтальным валами ротора.

Дезинтегратор (рис. 5.20) состоит из двух входящих один в другой роторов, представляющих собой диски *1* с закрепленными в них размольными элементами в виде пальцев *2*, вращающихся в противоположные стороны.

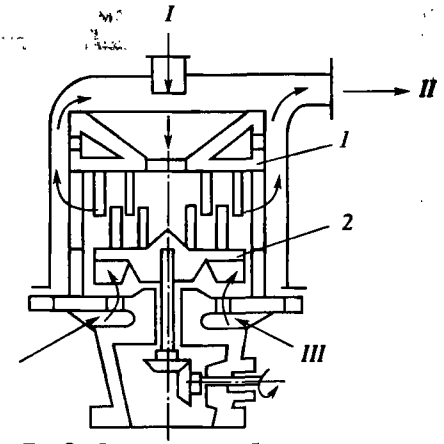


Рис. 5.19. Схема дисмембратора:
1 и *2* – соответственно неподвижный и подвижный диски; *I* и *II* – соответственно исходный и готовый продукты; *III* – воздух или газ

Промышленностью выпускаются дезинтеграторы для взрывоопасной рабочей среды. Они используются для непрерывного тонкого сухого измельчения твердых окислителей, например, калиевой силитры и других материалов [10].

В струйных мельницах измельчение достигается за счет взаимного соударения частиц, разгоняемых до скоростей порядка 100–200 м/с. К их достоинствам следует отнести возможность тонкого и сверхтонкого сухого помола, отсутствие вращающихся деталей, незначительное загрязнение продуктов измельчения. Вместе с тем струйные мельницы отличаются большими удельными энергозатратами, а также требуют установки после себя громоздкой системы пылеулавливания.

Типичная струйная мельница (рис. 5.21) содержит помольную камеру *5*, противо-

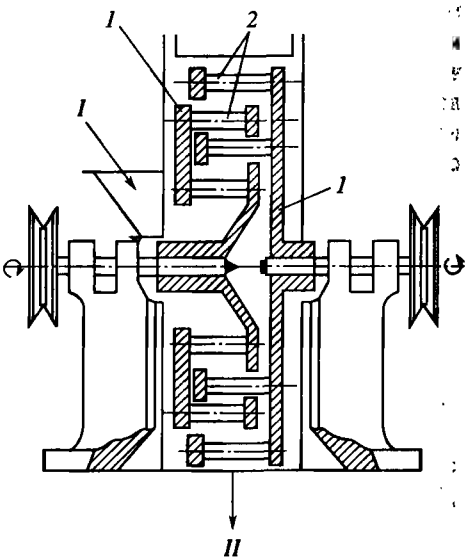


Рис. 5.20. Схема дезинтегратора:
1 – диски; *2* – пальцы; *I* и *II* – соответственно исходный и готовый продукты

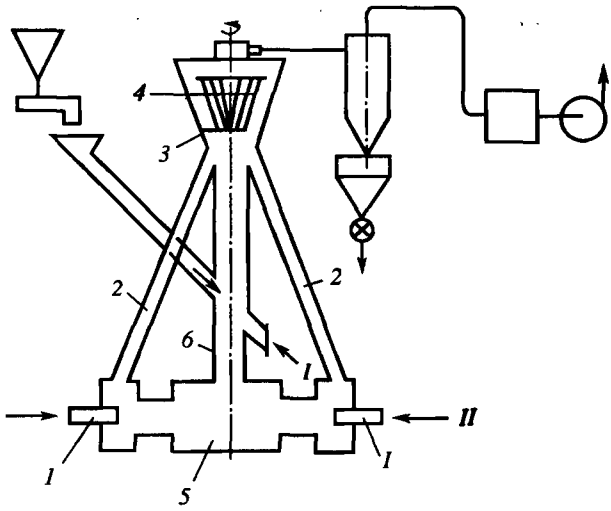


Рис. 5.21. Схема струйной мельницы

точные разгонные устройства *1*, сепарационную камеру *3* и вращающийся сепаратор *4*. Поступающий в патрубок *6* исходный материал *1* подхватывается потоком газа и разделяется в сепараторе *4* на мелкие и крупные частицы. Мелкие частицы выносятся из мельницы. Крупные частицы поступают по течкам *2* в эжекторы разгонных устройств *1*, куда также под давлением подается энергоноситель – воздух или инертный газ *II*. В помольной камере струи, несущие материал, сталкиваются и за счет соударения происходит разрушение частиц. Далее смесь размолотого материала и газа выносится в патрубок *6*.

Серийно выпускается струйный измельчитель производительностью до 1000 кг/ч, предназначенный для непрерывного тонкого измельчения химических материалов. Размер частиц исходного материала не более 250 мкм, готового продукта – 2–3 мкм; давление сжатого воздуха порядка 0,8 МПа.

Струйные мельницы могут быть использованы при измельчении твердых окислителей, например NH_4ClO_4, KNO_3 [10].

Дополнительные сведения о мельницах ударного действия, струйных мельницах и других типах измельчителей можно найти в книгах [3, 5–7], а также в работах И.Н. Блиничева, В.И. Акутина и др.

5.2. Классификация сыпучих материалов

Определение. Классификацией называется процесс разделения сыпучих материалов по крупности кусков или частиц.

Существуют три вида классификации: механическая (грохочение); пневматическая (сепарация); гидравлическая. В производстве ПВВ применяют главным образом грохочение. Принцип работы грохотов заключается в пропускании материала через разделительную перегородку с определенным размером отверстий.

В процессе грохочения необходимо обеспечить перемещение материала по разделительной перегородке и его перемешивание, чтобы крупные частицы не препятствовали мелким проходить сквозь отверстия. Во время движения по просеивающей поверхности материал разделяется на подрешетный и надрешетный классы. Частицы материала, размер которых меньше размера отверстий поверхности разделения, проходят через них и представляют собой подрешетный (нижний класс). Крупные частицы, не прошедшие через отверстия, называются надрешетным (верхним) классом. Надрешетный класс обозначается знаком плюс (+), подрешетный – знаком минус (–).

Качество процесса грохочения оценивают эффективностью грохочения $E_г$, под которой понимают выраженное в процентах или долях единицы отношение массы продукта m, прошедшего сквозь сито, к массе нижнего класса m_1 в исходном материале,

$$E_г = (m/m_1)100.$$

Основы вероятностной теории процесса грохочения. Рассмотрим некоторые теоретические предпосылки, поясняющие основы процесса грохочения и базирующиеся на вероятности прохождения зерна (частицы) через отверстие просеивающей поверхности. Пусть сферическая частица вертикально падает на просеивающую поверхность с квадратными отверстиями.

При этих условиях вероятность P прохождения частицы через отверстие будет определяться как отношение числа случаев n прохождения частицы через отверстие к общему числу всех случаев $n_{об}$:

$$P = n/n_{об}.$$

При $n = 0$ вероятность $P = 0$, т.е. ни в одном случае частица не прошла через отверстие. При $n = n_{об}$ вероятность $P = 1$, т.е. при каждом попадании частицы на просеивающую поверхность она проходила через отверстие.

Если принять, что ширина квадратного отверстия сита равна l, а толщина проволок сита равна a (рис. 5.22), то вероятность прохождения частицы диаметром d через ячейку сита

$$P = \frac{(l-d)^2}{(l+a)^2} = \frac{l^2}{(l+a)^2}\left(1-\frac{d}{l}\right)^2. \qquad (5.18)$$

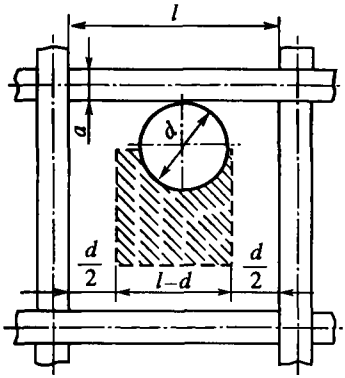


Рис. 5.22. Схема прохождения зерна через отверстие сита

Величина $l^2/(l+\alpha)^2 = \lambda$ характеризует отношение световой поверхности сита ко всей площади сита. Для весьма узкого класса частиц с относительным размером $x = d/l$ формула (5.18) может быть представлена в виде

$$P = \lambda(1-x)^2.$$

Показатель N, обратный вероятности P, определяет вероятное число отверстий, которое надо встретить частицами, чтобы беспрепятственно пройти через них:

$$N = 1/P = \frac{1}{\lambda(1-x)^2}. \qquad (5.19)$$

Встреча с этим числом отверстий обеспечивается при определенной продолжительности грохочения.

На рис. 5.23 приведена зависимость N от отношения d/l при $\lambda = 0{,}86$. Как видно из графика, даже небольшое увеличение d сверх $0{,}75l$ вызывает необходимость значительного увеличения числа отверстий для прохождения этой частицы сквозь просеивающую поверхность. Поэтому частицы размером менее $0{,}75l$ условились называть легко грохотимыми (*1*), а частицы размером более $0{,}75l$ – трудно грохотимыми (*2*).

На показатели грохочения большое влияние оказывает гранулометрический состав материала. Большое содержание в исходном материале нижнего класса способствует повышению производительности и эффективности грохочения.

Вероятностная теория процесса грохочения базируется на рассмотрении условий прохождения единичной частицы через отверстие просеивающей поверхности. В действительности процесс грохочения протекает значительно сложнее. Результаты изучения работы грохотов в производственных условиях, а также экспериментальные данные позволили установить закономерности этого процесса и определить технологические параметры используемых машин и их технические характеристики.

Технологические схемы грохочения. При грохочении сыпучего материала с выделением более двух классов применяется один из трех способов (рис. 5.24).

При грохочении от мелкого класса к крупному (рис. 5.24, *а*) сита располагаются последовательно в одной плоскости. Исходный материал поступает сначала на самое мелкое сито, затем на более крупное (размер отверстий $b_1 < b_2 < b_3$). Достоинства грохочения по этому способу: удобство смены сит и наблюдение за их состоянием; рассредоточенность разгрузки классов по длине сит, облегчающая распределение классов. Недостатки этого способа грохочения: пониженная эффективность разделения, так как вся масса материала загружается на сито с самыми мелкими отверстиями, которые перекрываются крупными кусками; перегрузка и повышенное изнашивание мелких сит; значительное крошение хрупкого материала.

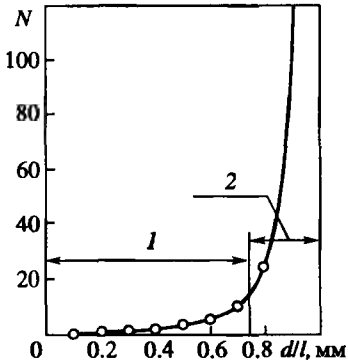


Рис. 5.23. Зависимость числа отверстий от размера частиц

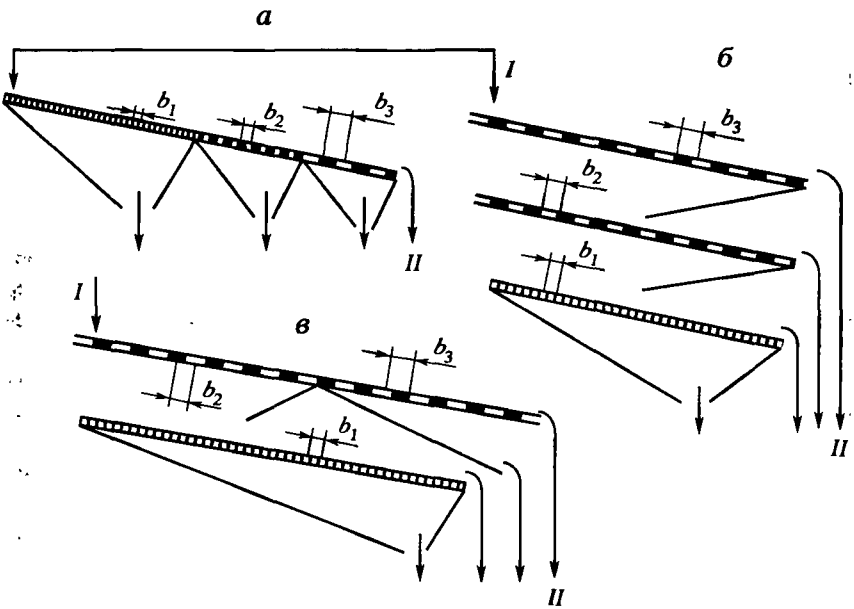


Рис. 5.24. Способы грохочения:
I и *II* – соответственно исходный и готовый продукты; b_1–b_3 – размеры отверстий сит

При грохочении от крупного класса к мелкому (рис. 5.24, *б*) обеспечиваются высокая эффективность грохочения, бóльшая долговечность сит, достаточное использование рабочего объема грохота. К недостаткам этого способа относится затрудненный доступ для осмотра сит, их ремонта и замены, что в условиях непрерывных технологических процессов весьма существенно.

Недостатки первых двух способов грохочения частично преодолеваются при грохочении комбинированным способом (рис. 5.24, *в*). При этом способе грохочения исходный материал подается на среднее сито. Большая площадь мелкого сита и его расположение под крупными ситами обеспечивают высокую производительность грохота, так как на мелкое сито подается только часть исходного материала, а производительность всего грохота обычно ограничивается пропускной способностью мелкого сита.

Конструкции грохотов. В химической и смежных отраслях промышленности нашли применение грохоты трех типов: барабанные, плоские качающиеся и вибрационные.

Вибрационные грохоты могут иметь привод от электродвигателя или приводиться в колебательное движение электромагнитным вибровозбудителем. Приводимые от электродвигателя грохоты делятся на гирационные (эксцентриковые) наклонные, инерционные наклонные и инерционные горизонтальные. В настоящее время чаще всего используются инерционные грохоты благодаря их высоким эксплуатационным качествам по сравнению с грохотами других типов.

Рабочей частью грохота является просеивающая поверхность; она может быть выполнена в виде сетки – сит, решета – стального листа с отверстиями, или колосниковой решетки.

Плетеные сита изготовляют из стальной или латунной проволоки чаще с квадратными ячейками. Установлены два ряда размеров ячеек: основной и дополнительный. Основной размер представляет собой нормальный ряд чисел – прогрессию со знаменателем $\sqrt[20]{10} = 1{,}122$; размер ячеек основного ряда 0,04–140 мм. Дополнительный ряд имеет знаменатель $\sqrt[40]{10} = 1{,}059$; в этом ряду пропущены члены, входящие в основной ряд. Размер ячеек дополнительного ряда 0,042–150 мм. Помимо сит с квадратными ячейками, используют сетки с прямоугольными ячейками; в прямоугольных ячейках обычно соотношение сторон 1 : 2,5.

Плетеные сита с малыми размерами отверстия выполняют также из шелка и полимерных материалов.

Простейшими по устройству являются сита струнного типа, состоящие из ряда параллельно расположенных натянутых проволок.

Решета изготовляют из металлических листов с круглыми отверстиями для грохочения материалов с относительно круглой формой кусков (частиц) и с продолговатыми отверстиями – для классифика-

ции материалов с кусками удлиненной формы. Отверстия могут быть также квадратными и прямоугольными.

Отверстия различной формы на решете обычно располагают в шахматном порядке, что позволяет увеличить световую поверхность сит, а также существенно улучшить условия разделения материала.

В промышленности применяют сита (решета) с отверстиями определенных размеров; сторона квадратных отверстий может быть 5–150 мм; диаметр круглых – 7–95 мм. Толщина листов сит при размере отверстий 30–60 мм равна 4–6 мм, при размере отверстий 30–60 мм – 8–10 мм. Для грохочения используют чаще всего листовые сита с отверстиями размером 10–80 мм. При бóльших размерах отверстий обычно устанавливают колосниковые решетки, при меньших – проволочные сетки.

Для грохочения абразивных материалов применяют листовые сита из резины или полиуретана с квадратными и прямоугольными отверстиями.

Колосниковые решетки собирают из стержней обычно трапециевидного сечения. В решетке размер отверстий увеличивается сверху вниз, что уменьшает их забивание материалом.

Инерционные грохоты обладают высокой производительностью, небольшой амплитудой (2–6 мм) и большой частотой колебаний (15–25 в секунду). При частых колебаниях грохотов находящийся на сите материал расслаивается, крупные частицы оказываются сверху, что способствует ускорению рассева и делает его более точным.

Среди вибрационных грохотов наибольшее распространение получили инерционные наклонные грохоты с круговыми колебаниями и инерционные грохоты с направленными колебаниями (рис. 5.25).

Вал *2* (рис. 5.25, *а*) грохота с неуравновешенными (дебалансными) дисками *1* смонтирован на подшипниках *3*, закрепленных на подвижной раме *4*. Рама с укрепленным на ней просеивающим коробом *6* установлена на демпфирующих опорах *5*. При вращении вала рама *4* вибрирует под действием сил инерции дисков *1*. Амплитуда колебаний рамы зависит от жесткости пружин и сил инерции неуравновешенных масс. Раму грохота устанавливают наклонно в сторону выхода материала. Благодаря конструкции опорных устройств просеивающую поверхность возможно располагать под углом наклона до 30° к горизонтальной линии. Грохот опирается на фундамент или подвешивается с помощью пружинных амортизаторов. Он несложен по устройству, надежен и эффективен в эксплуатации.

В корпусе *5* грохота с направленными колебаниями (рис. 5.2,*б*) на подшипниках *3* установлены два дебалансных вала *2* и *4*. Вал *2* соединен со шкивом приводного электродвигателя. Вал *4* приводится во вращение от вала *2* зубчатой передачей *1* с передаточным отношением,

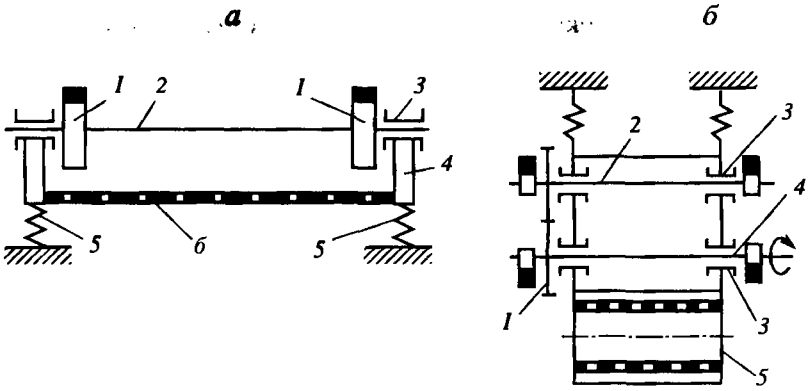


Рис. 5.25. Схемы грохота с круговыми (*а*) и направленными (*б*) колебаниями

равным единице, что обеспечивает синхронное вращение дебалансных валов. Угол между линией действия вынуждающей силы вибровозбудителя и плоскостью сита устанавливают в пределах 35–45°. Грохоты выпускаются либо с неподвижной рамой, либо без нее. В последнем случае грохот подвешивается на виброизолирующих элементах или опирается на них.

Характеристики некоторых отечественных вибрационных грохотов приведены в табл. 5.2.

В некоторых случаях, в основном при грохочении мелких фракций сыпучих материалов, применяют грохоты, у которых колебания просеивающей поверхности создаются электромагнитным вибратором. Преимущество таких грохотов заключается в отсутствии вращающихся и трущихся частей. Колебания сообщаются только разделяющей поверхностью, а рама остается неподвижной.

В последнем случае грохот подвешивается на виброизолирующих элементах или опирается на них. В качестве виброопор в современных конструкциях грохотов обычно применяют цилиндрические пружины сжатия или прорезные винтовые пружины растяжения-сжатия. В некоторых случаях в качестве упругих опор применяют надувные подушки из прорезиненной ткани.

Колебания сообщаются только разделяющей поверхности, а рама остается неподвижной. Электромагнитные вибраторы позволяют регулировать амплитуду колебаний, сохраняют постоянную частоту колебаний при любых нагрузках и обеспечивают бесшумность работы.

Таблица 5.2

Техническая характеристика вибрационных инерционных грохотов

Параметр	Значения параметра для грохочения				
	с круговыми колебаниями			с направленными колебаниями	
Размер просеивающей поверхности, мм:					
ширина	1500	1750	2000	1000	1250
длина	3750	4500	5000	2500	2000
Число ярусов сит	2	2	2	2	2
Размер ячеек сит, мм	3–70	3–70	3–70	3–40	3–40
Угол наклона просеивающих поверхностей, град.	10–25	10–25	10–25	0	0
Наибольший размер загружаемых кусков, мм	150	200	150	100	100
Частота колебаний, $мин^{-1}$	960	900	900	750	750
Амплитуда колебаний, мм	4,0–4,2	4,2	4,2	9,4	9,0
Мощность электродвигателя, кВт	10	17	17	2,7 × 2	5,5
Масса, кг	3300	3800	5650	1600	2200
Габаритные размеры, мм:					
длина	4500	5080	5870	3200	3750
ширина	2410	2448	2620	2000	1930
высота	1300	1230	1380	1600	1500

Важнейшими параметрами, определяющими производительность и эффективность грохочения, являются размеры просеивающих поверхностей, частота и амплитуда вибрации, угол наклона просеивающей поверхности грохота, направление вращения вала вибратора и траектория движения разделительной перегородки.

Отношение ширины просеивающих поверхностей вибрационных грохотов к их длине принимают равным 1 : 2,5; у колосниковых грохотов это отношение составляет 1 : 2.

Оптимальные значения амплитуды и частоты вибрации грохота зависят от выбранной траектории его движения. Совокупность этих факторов предопределяет значения производительности, эффективности грохочения и способности грохота к самоочищению отверстий сит от застрявших зерен или гранул (частиц). Экспериментально установлено [3], что отверстия сита не забиваются частицами материала, если

высота h подбрасывания частиц над поверхностью сита превышает 0,4 размера отверстия l, т.е. $h \geqslant 0{,}4\,l$.

Исходя из этого, в работе [4] рекомендуется определять частоту колебаний грохотов по формулам:

для инерционных наклонных грохотов

$$f = 44\sqrt{l/a};$$

для горизонтальных грохотов с прямолинейными колебаниями

$$a = (4 + 140l)/1000;\ f = (1 + 12{,}5l)/12a,$$

где f – частота колебаний, $с^{-1}$; a – амплитуда колебаний грохота, м.

Для наклонных грохотов обычно принимают $a = 2 \div 5$ мм, расчетное значение $l = 0{,}07$ м; для горизонтальных грохотов с направленными колебаниями расчетное значение $l = 0{,}04$ м.

С уменьшением угла наклона грохота снижается производительность и возрастает эффективность разделения сыпучего материала. Обычно у наклонных грохотов угол наклона к линии горизонта может быть 0–30°; у колосниковых грохотов угол наклона 0–25°, что обеспечивает скольжение материала по поверхности колосников.

Производительность грохотов Q определяется следующей формулой [3]:

$$Q = q\,F\,k_1k_2k_3k_4,$$

где q – удельная производительность грохота для определенного размера отверстий сит, $м^3/(ч \cdot м^2)$; F – площадь поверхности сита, $м^2$; k_1 – коэффициент, учитывающий угол наклона сита к горизонтали; k_2 – коэффициент, учитывающий содержание нижнего класса в исходном материале; k_3 – коэффициент, учитывающий содержание в нижнем классе частиц размером меньше половины размера отверстия сита; k_4 – коэффициент, учитывающий неравномерность питания, размеры и форму частиц, тип грохота.

Значения q в зависимости от размера отверстия следующие:

Размер квадратного отверстия в свету, мм	5	7	10	14	16	18	20	25	35	40
q, $м^3/(ч \cdot м^2)$	12	16	23	32	37	40	43	46	50	62

Значения k_1 принимаются следующими:

Угол наклона сита, град.	9	10	11	12	13	14	15	17	20	22
k_1	0,45	0,50	0,56	0,61	0,67	0,73	0,80	0,92	1,18	1,37

Значения k_2 принимаются следующими:

Содержание частиц нижнего класса в исходном материале, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
k_2	0,58	0,66	0,76	0,84	0,92	1,00	1,08	1,17	1,25

Значения k_3 принимаются следующими:

Содержание в нижнем классе частиц размером меньше половины размера отверстия, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
k_3	0,63	0,72	0,82	0,91	1,00	1,09	1,18	1,28	1,37

Значения коэффициента k_4: для горизонтального грохота при разделении материалов типа гравия $k_4 = 0{,}80$, типа щебня $k_4 = 0{,}65$; для наклонного инерционного грохота соответственно $k_4 = 0{,}60$ и 0,50.

Производительность грохотов с двумя и тремя ситами надо рассчитывать по наиболее загруженному ситу.

Мощность электродвигателя рассчитывают следующим образом. При грохочении происходят потери энергии на трение в подшипниках грохота и электродвигателя, при транспортировании материала и прохождении частиц сквозь отверстия сита, а также в опорах и местах соединения элементов.

Общие затраты мощности

$$N_{об} = N_{тр} + N_{гр},$$

где $N_{тр}$, $N_{гр}$ – мощности, расходуемые соответственно на трение в роликоподшипниках и перемещение и классификацию материалов, кВт.

Мощность

$$N_{тр} = 10^{-3} M_{тр}\omega,$$

где $M_{тр}$ – момент трения, Н· м; $M_т = F_п \mu D/2$ Н·м (здесь $F_п$ – нагрузка на подшипники, Н; μ – приведенный коэффициент трения; для подшипников качения $\mu = 0{,}001 \div 0{,}005$; D – диаметр вала, м); ω – угловая частота вращения вала, $с^{-1}$.

Нагрузка на подшипники равна силе инерции, развиваемой массой дебалансов $m_д$; при дорезонансном режиме:

$$F_п = m_д(a + r_д)\omega^2,$$

где a – амплитуда колебания короба грохота; $r_д$ – эксцентриситет дебалансов.

Для определения мощности $N_{гр}$, затрачиваемой на перемещение и классификацию материала, предложена зависимость [3]:

$$N_{гр} = 2{,}3LQ\left(c_в + \frac{c_н}{2}\right)\rho_м / (vE_г),$$

где L – длина просеивающей поверхности грохота, м; Q – производительность грохота по исходному питанию, м^3/с; $c_в$, $c_н$ – содержания соответственно верхнего и нижнего классов в исходном материале (определяются по результатам ситового анализа), %; $\rho_н$ – насыпная плотность исходного материала, кг/м^3; v – скорость перемещения материала по поверхности просеивания, м/с; $E_г$ – эффективность грохочения, %.

Скорость перемещения материала по поверхности сита зависит от тех же факторов, что и производительность грохота.

Скорость v для наклонных грохотов с круговой вибрацией может быть определена по формуле

$$v = 2\cdot 10^{-8}\, k_Q k_\alpha a\omega^2,$$

где a – амплитуда перемещения короба, мм; ω – угловая частота вращения вала вибровозбудителя, мин$^{-1}$; k_α – коэффициент, учитывающий угол α наклона поверхности просеивания грохота к горизонтали; k_Q – коэффициент, учитывающий производительность Q 1 м ширины сита грохота, причем

$k_Q = 0{,}9 \div 1{,}2$ при $Q = 20 \div 40$ м^3/(м·ч),

$k_Q = 0{,}7 \div 0{,}9$ при $Q = 60 \div 200$ м^3/(м·ч).

Коэффициент k_α в зависимости от угла наклона α имеет следующие значения:

α, град.	8	10	12	14	16	18	20	22	24
k_α	0,96	1,46	2,10	2,90	3,90	5,08	6,50	8,10	10,0

Практика эксплуатации наклонных грохотов показывает [3], что при изменении угла наклона просеивающей поверхности от 5 до 20° скорость v соответственно возрастает от 0,2 до 1 м/с.

Для горизонтальных грохотов рекомендуется принимать $v = 0{,}74$ ($v_{гр} - 0{,}23$), где амплитуда скорости колебаний корпуса (в метрах, деленных на секунды)

$$v_{гр} = \omega a.$$

Мощность электродвигателя находят с учетом его КПД $\eta_{эд}$: $N_{эд} = N_{об}/\eta_{эд}$. По каталогу подбирают электродвигатель ближайшей мощ-

ности и одновременно уточняют его значение $\eta_{эд}$.

Кроме того, необходимо проверить мощность электродвигателя по времени пуска грохота

$$t_{п} = \frac{\left[J_{эд} + (J_{в} + J_{к})/i^2\right]\omega_{эд}^2}{10^3 k_{п} N_{эд}},$$

где $J_{эд}$, $J_{в}$, $J_{к}$ – моменты инерции соответственно ротора электродвигателя, вращающихся частей вибровозбудителя и колеблющегося короба грохота, кг·м^2; i – передаточное число; $\omega_{эд}$ – угловая частота вращения ротора электродвигателя, с$^{-1}$; $k_{п}$ – коэффициент кратности пусковой мощности электродвигателя (из паспорта электродвигателя); $N_{эд}$ – мощность электродвигателя, кВт.

По рекомендации В.А. Баумана [3] время пуска $t_{п}$ не должно превышать 5 с.

Грохоты как с круговым, так и с прямолинейным движением сит работают, как правило, за резонансным режимом. Жесткость пружин, применяемых в современных грохотах, обеспечивает зарезонансный режим колебаний. Для обеспечения плавного и бесшумного перехода через резонансную частоту выбирают минимально допустимую жесткость пружин после их расчета на прочность и устойчивость.

Дополнительные сведения о пневматической сепарации частиц твердых дисперсных сред и гидравлической классификации можно найти в работах [3, 5, 6, 11] и др.

5.3. Смешивание сыпучих материалов

Критерии оценки качества смеси. Под процессом *смешивания* (или смешения) понимают такой механический процесс, в результате которого первоначально находящиеся раздельно компоненты после равномерного распределения каждого из них в смешиваемом объеме образуют однородную смесь.

Обратным процессу смешивания является процесс *сегрегации*, приводящий к разделению смеси на отдельные компоненты.

В состав смесей ПВВ может входить различное число компонентов; есть композиции, в состав которых входит до десятка компонентов. Соотношение масс компонентов (их массовое содержание) в смеси может изменяться в широком диапазоне – по величине до нескольких порядков.

В любом микрообъеме идеально однородной смеси с феноменологической точки зрения должны находиться частицы всех компонентов в количествах, определяемых заданным их соотношением. Однако такое идеальное расположение частиц в объеме смеси в действительно-

сти не наблюдается. В произвольно выбранных микрообъемах смеси возможно большое число сочетаний частиц различных компонентов, т.е. их распределение в смеси случайно. Поэтому большинство методов оценки однородности (или качества) смеси основаны на методах *статистического анализа.*

Для упрощения расчетов все смеси условно считаются двухкомпонентными, состоящими из так называемого *ключевого компонента* и условного, включающего все остальные компоненты смесей. Подобный прием позволяет оценивать однородность смеси параметрами распределения одной случайной величины – содержанием ключевого компонента в пробах смеси. В качестве ключевого компонента обычно выбирают такой компонент, который легко подвергается количественному анализу, либо его распределение в смеси строго регламентировано техническими требованиями на готовую смесь.

В качестве критерия оценки однородности смеси наиболее часто используется *коэффициент вариации* V_c, который выражают в долях от единицы или процентах

$$V_c = \frac{1}{\bar{c}}\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum(c_i - \bar{c})^2} \text{ или } V_c = \frac{100}{\bar{c}}\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum(c_i - \bar{c})^2},$$

где $\bar{c}$ – среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента во всех n пробах смеси, %; c_i – концентрация ключевого компонента в i-й пробе смеси, %.

Применительно к процессу смешивания сыпучих материалов этот критерий называют *коэффициентом неоднородности*, так как с его увеличением неоднородность смеси возрастает.

Для одной и той же смеси значения критерия V_c зависит от массы проб и их числа. Чем меньше масса отбираемых проб, тем больше значение V_c. Число проб n, отбираемых из смеси и подвергаемых затем количественному анализу на содержание в них ключевого компонента, определяет надежность оценки качества смеси.

Если исследуемый показатель содержания ключевого компонента в смеси подчиняется нормальному закону распределения, что обычно бывает на практике, то можно оценить *доверительную вероятность* α того, что значение $\bar{c}$ отличается от истинного значения $c_{ис}$ на величину, меньшую чем Δc:

$$P = [(\bar{c} - \Delta c) < c_{ис} < (\bar{c} + \Delta c)] = \alpha.$$

Обычно ограничиваются доверительной вероятностью 0,9 или 0,95; точность оценки определяется формулой

$$\Delta c = \sigma_c t_c / \sqrt{n},$$

где σ_c – статистическое среднеквадратическое отклонение;

$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_1^n (c_i - \bar{c})^2}{n-1}}$; t_c – коэффициент Стьюдента, который зависит от объема выборки n и заданной доверительной вероятности α (табл. 5.3); $t_c = \sigma_c/c$.

В целом ряде случаев при экспериментальных исследованиях необходимо определить минимальный объем выборки (число опытов), который с заданной точностью Δc и доверительной вероятностью α позволит определить искомую величину. При распределении случайной величины по нормальному закону и при известном среднеквадратическом отклонении σ_c или коэффициенте вариации V_c объем выборки

$$n = \frac{t_c^2\sigma_c^2}{(\Delta c)^2} = \frac{t_c^2\sigma_c^2}{\varepsilon^2\bar{c}^2} = \frac{t_c^2 V_c^2}{\varepsilon^2},$$

где ε – относительная точность измерения; $\varepsilon = \Delta c/\bar{c}$.

Если σ_c или V_c неизвестны, то их определяют по результатам предварительных исследований.

Пример. Определить число проб для расчета содержания ключевого компонента в смеси, необходимое для получения точности измерения 10%, с вероятностью $\alpha = 0{,}95$. При предварительном исследовании процесса смешивания для $n = 6$ получено $V_c = 0{,}02$.

При $n = 6$ и $\alpha = 0{,}95$ из табл. 5.3 находим $t_c = 2{,}57$. При $\varepsilon = 0{,}01$ необходимое число опытов $n = (2{,}57)^2 \cdot (0{,}02)^2/(0{,}01)^2 = 26{,}4$, т.е. требуется провести 27 замеров содержания ключевого компонента в смеси.

Для сыпучего материала минимально допустимая масса пробы, г[1]

Таблица 5.3

Значения коэффициента Стьюдента

n	Значения t_c при α				n	Значения t_c при α			
	0,90	0,95	0,98	0,99		0,90	0,95	0,98	0,99
2	6,31	12,71	31,82	63,66	9	1,86	2,31	2,90	3,36
3	2,92	4,30	6,96	9,92	10	1,84	2,26	2,76	3,25
4	2,35	3,18	4,54	5,84	15	1,76	2,14	2,60	2,98
5	2,13	2,78	3,75	4,60	20	1,73	2,09	2,53	2,86
6	2,01	2,57	3,65	4,03	30	1,70	2,04	2,46	2,76
7	1,94	2,45	3,14	3,71	60	1,67	2,00	2,39	2,66
8	1,90	2,36	2,97	3,56	∞	1,65	1,96	2,33	2,58

$$G_м = 1{,}2 \cdot 10^4 d_э^3 \rho_ч / c_0,$$

где $d_э$ – эквивалентный диаметр частицы, см; $\rho_ч$ – плотность материала частицы, г/см^3; c_0 – концентрация ключевого компонента в смеси, %.

Для порошкообразных материалов масса проб обычно составляет 1–5 г.

Для смесей высокой однородности коэффициент неоднородности $V_c < 2\%$, хорошего качества $2\% < V_c < 5\%$, низкого качества $5\% < V_c < 8\%$. В промышленных смесителях не удается получать смесь со значениями $V_c < 1{,}5\%$ (при массе пробы 1 г).

Теория процессов смешивания. В настоящее время не создана пока обобщающая теория процессов смешивания сыпучих материалов и математических методов их исследования. Изложенный здесь материал лишь знакомит с существующими подходами к анализу процессов смешивания и методами проведения этого анализа.

При периодическом процессе смешивания экспериментальные зависимости V_c от времени смешивания t, полученные для различных конструкций смесителей и режимов их работы, называются *кинетическими кривыми смешения*. Эти кривые имеют три характерных участка (рис. 5.26), каждый из которых соответствует определенному по времени периоду смешивания.

В периоде *I* преобладает процесс смешивания по сравнению с процессом сегрегации. За счет уменьшения агрегатов из одинаковых частиц и конвективного переноса их по внутреннему объему смесителя происходит резкое снижение коэффициента неоднородности.

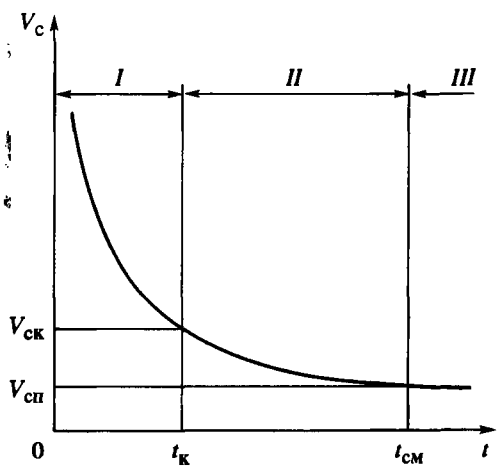


Рис. 5.26. Кинематическая кривая процесса смешивания сыпучих материалов в смесителях периодического действия

В периоде *II* скорость процесса смешивания становится соизмеримой со скоростью сегрегации, поэтому значения V_c от момента $t_к$ со временем изменяются незначительно. Процесс смешивания реализуется в основном за счет перемещения и перераспределения отдельных частиц одна относительно другой и получил название диффузионного смешивания.

В периоде *III* элементар-

ные процессы смешивания (конвективное и диффузионное смешивание) по скорости равны процессу сегрегации, поэтому в некоторый момент времени $t_{см}$, называемым оптимальным временем смешивания, коэффициент неоднородности V_c становится постоянным.

Предельно достижимое значение коэффициента неоднородности V_c конкретной смеси определяется экспериментально и зависит от многих факторв: физико-механических свойств смеси, конструкции смесителя и режима его работы.

Кинетику процесса периодического смешивания чаще всего описывают уравнением типа

$$V_c(t) = aV_{co}e^{-\Phi t} \quad \text{при } t \leqslant t_{см},$$

где $V_c(t)$ – коэффициент неоднородности смеси к моменту времени t; a – коэффициент пропорциональности; V_{co} – коэффициент неоднородности смеси в начальный момент смешивания (определяется соотношением компонентов смеси); Φ – функция (или параметр), зависящая от физико-механических свойств смеси, геометрических размеров и технологических параметров работы смесителя и имеющая размерность, обратную времени.

При непрерывном процессе смешивания в постоянно действующих смесителях поступление компонентов на смешение и выдача готовой смеси осуществляются непрерывно. В отдельных случаях компоненты поступают в смеситель дискретно.

Качество приготовленной смеси в таких смесителях зависит не только от процесса смешивания, но и от характеристик питающих потоков и их дозирования. Практически ни один питатель или дозатор не может обеспечить непрерывное поступление материала в строго заданном количестве в каждый момент времени. Следовательно, на основную задачу смесителя (качественное смешивание поступающих компонентов) накладывается дополнительное условие, связанное со снижением или «сглаживанием» флуктуаций питающих потоков.

Существуют различные подходы теоретического анализа работы непрерывно действующих смесителей от *практических рекомендаций*, базирующихся на инженерном опыте осуществления процессов смешивания на смесителях различной конструкции, до *математического описания*.

При недостаточной информации о физической сущности происходящих явлений или их большой сложности, т.е. при невозможности составить их *детерминированную модель* в виде функциональных зависимостей, отображающих физическую природу явлений, используют экспериментально-статистические методы. В результате математическое описание процесса смешивания осуществляется на уровне *эмпирических соотношений*, связывающих основные характеристики про-

цесса смешивания. В рамках рассматриваемого подхода нередко проводят чисто формальную обработку опытных данных, используя соотношения (типа регрессионных моделей и др.) вне физических представлений о механизме протекания процесса смешивания и тем самым заведомо ограничивая возможности использования расчетного уравнения узкими рамками проведенного эксперимента.

Для математического описания процесса смешивания на уровне *аналитического исследования* с учетом *физической сущности* сопровождаемых явлений (феноменологический подход) используют уравнения переноса массы, описывающие изменение концентрации вещества в потоке смеси, перемещаемой в объеме смесителя. Применительно к процессам смешивания сыпучих материалов наиболее часто используют *диффузионную* и *ячеечную* математические модели.

Для описания упрощенной диффузионной модели потока с осесимметричным поршневым движением материала с учетом продольного и поперечного перемешивания частиц используют уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v\frac{\partial c}{\partial x} + \overline{D}_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \overline{D}_R \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial c}{\partial r}\right), \qquad (5.20)$$

где c – концентрация ключевого компонента; t – время; v – линейная скорость потока; x, r – координаты соответственно вдоль и поперек потока; $\overline{D}_L$ и $\overline{D}_R$ – параметры соответственно продольного и поперечного перемешивания (аналоги коэффициентов диффузии).

Из-за сложности решения уравнения (5.20), называемого уравнением двухпараметрической диффузионной модели, его часто упрощают, полагая, например, что $\overline{D}_R = 0$. Такое упрощенное уравнение называют однопараметрической диффузионной моделью.

Значения $\overline{D}_L$ и $\overline{D}_R$ для каждого конкретного процесса смешивания находят экспериментально на опытных образцах смесителя (физических моделях), что снижает ценность диффузионных моделей для практического использования.

Частные решения уравнения (5.20) при условии, что $v\frac{\partial c}{\partial x} << \overline{D}_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ и $\overline{D}_R = 0$, часто приводятся к виду:

$$c(x,t)\sum_{n=1}^{\infty} a_n e^{-\overline{D}_L\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t}\sin\left(\frac{n\pi}{l}x\right),$$

где a_n – коэффициенты разложения; l – длина рабочей зоны смесителя.

Ячеечная модель предполагает, что поток материала в смесителе последовательно проходит через ячейки, представляющие собой микрообъемы, в пределах которых осуществляется идеальное смешивание. Эта модель описывается m-ым числом линейных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{1}{m}\frac{\partial c}{\partial t} = \bar{t}(c_{i-1} - c_i),$$

где m – число ячеек, адекватных по воздействию на поток реальному смесителю; $\bar{t}$ – среднее время пребывания частиц в ячейках от i-й до $(i-1)$-й ячейки.

При $m = 1$ ячеечная модель переходит в модель идеального смешивания, а при $m = \infty$ – в модель идеального вытеснения.

Таким образом, аналитическое исследование работы смесителей связано с решением дифференциальных или интегро-дифференциальных уравнений, описывающих динамические характеристики процессов смешивания, что часто представляет трудную, а иногда неразрешимую задачу.

Любой непрерывно действующий смеситель с входными и выходными потоками упрощенно можно представить в качестве преобразователя (регулятора) поступающих на его вход сигналов (или сигнала) в выходной сигнал, как это используется, например, при анализе систем автоматизированного регулирования или управления [12]. Сигналы отображают материальные потоки на входе, например, концентрацию ключевого компонента $c(t)_{вх}$ и выходе – $c(t)_{вых}$.

Математическая зависимость, связывающая выходной сигнал объекта с входным, называется *математической моделью* или *характеристикой объекта регулирования* (в данном случае – смесителя).

Если смеситель непрерывного действия относится к категории *линейных систем,* то можно записать следующую связь между выходным и входным сигналами:

$$c_{вых}(t) = A[c_{вх}(t)], \qquad (5.21)$$

где A – оператор преобразования.

Математические выражения A называют *динамической характеристикой объекта* (системы). Она не зависит от времени и определяется для процесса смешивания структурой потоков внутри объекта. Если представляется возможность составить детерминированную модель объекта, то его динамическая характеристика обычно описывается в виде дифференциальных, интегральных или интегро-дифференциальных уравнений. Как уже отмечалось выше, решения этих уравнений чрезвычайно трудоемки, а для объектов, описываемых уравнениями высоких порядков, решения в явном виде часто вообще невозможны.

Однако в ряде случаев решение таких уравнений значительно облегчается, если их записать не через *оригиналы функций*, а в виде *изображений функций*, полученных операционным методом с помощью прямого преобразования Лапласа.

Если оригинал $c(t)$ представляет собой функцию времени t, то изображение этой функции $C(p)$ есть функция комплексной переменной p, задаваемой в виде следующего интеграла:

$$C(p) = \int_0^\infty c(t)t^{-pt}dt = L[c(t)],$$

где L – символ прямого преобразования Лапласа.

Для отыскания оригинала решения, полученного в операторной форме, его подвергают так называемому обратному преобразованию Лапласа:

$$c(t) = L^{-1}[C(p)],$$

где L^{-1} – символ обратного преобразования Лапласа.

Фактически производить операции прямого и обратного преобразования Лапласа во многих случаях не приходится, так как имеются достаточно обширные таблицы соответствий между наиболее распространенными оригиналами и изображениями, приведенными, например, в [13]. В результате преобразования функций по Лапаласу дифференциальные и интегральные уравнения преобразуются в гораздо более простые для решения алгебраические уравнения. Кроме того, изображения являются часто более простыми функциями, чем оригиналы.

Если смеситель рассматривать как объект или устройство регулируемой системы, то для их характеристики пользуются не уравнениями, записанными в виде изображений функций, а их *передаточными функциями*. Под передаточной функцией $W(p)$ понимают отношение изображения выходной величины для объекта или устройства системы (для рассматриваемого случая – $C(p)_{вых}$) к изображению функции входной величины $C(p)_{вх}$, полученных при нулевых начальных условиях, т.е.

$$W(p) = \frac{C_{вых}(p)}{C_{вх}(p)}. \qquad (5.22)$$

Передаточная функция в оперативной форме описывает зависимость выходного сигнала исследуемого объекта от входного сигнала и, следовательно, полностью характеризует его динамические свойства. Тогда смеситель можно изобразить в виде условной схемы, представленной на рис. 5.27.

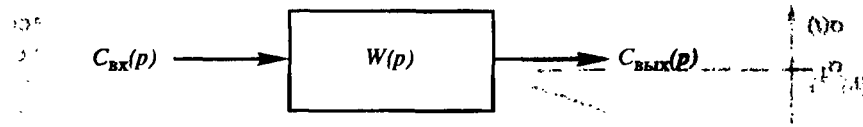


Рис. 5.27. Упрощенная схема смесителя непрерывного действия

Существуют *экспериментальные методы* определения вида зависимости (5.22). Они заключаются в том, что при установившемся режиме работы объекта управления (смесителя) вносится возмущающее воздействие по линии входного сигнала (например, при дозировании материалов в смеситель – резкое изменение концентрации ключевого компонента). С момента нанесения возмущающего воздействия регистрируются вызванные им изменения регулируемого параметра во времени.

Типовые функции входных сигналов представлены на рис. 5.28. В большинстве случаев в качестве возмущающей функции используется скачкообразное изменение входного сигнала, что описывается уравнением

$$c_{вх}(t) = c_{вх}(t_0) \cdot 1(t),$$

где $c_{вах}(t_0)$ – амплитуда скачкообразного воздействия; $1(t)$ – единичная функция, которая равна нулю при $t < t_0$ и равна единице при $t \geqslant t_0$; t_0 – время начала возмущающего воздействия.

Относительное значение входного сигнала

$$\mu = \Delta c_{вх}(t)/c_0,$$

где c_0 – нормированное значение входного сигнала (например, нормированная концентрация ключевого компонента в смеси).

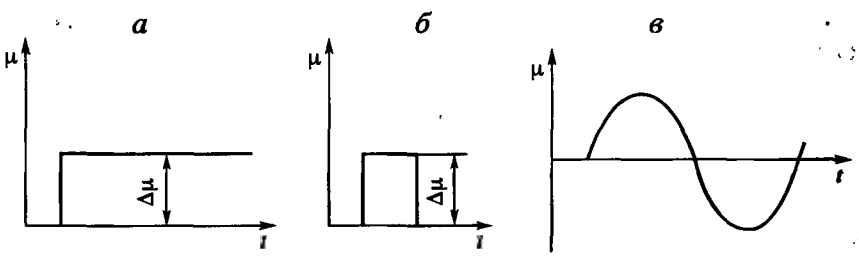


Рис. 5.28. Типовые функции входных сигналов:
а – скачкообразного; *б* – импульсного; *в* – синусоидального

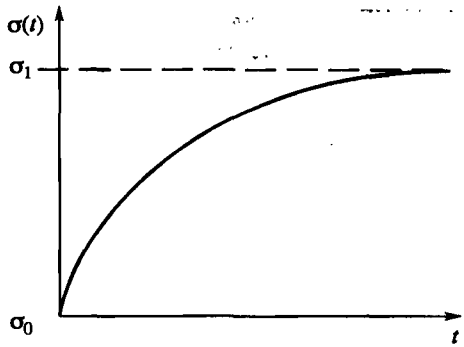


Рис. 5.29. Кривая разгона

Переходной процесс смешивания в смесителе, вызванный возникшим скачкообразным возмущением, регистрируется как функция $\sigma(t)$ изменения регулируемого параметра по времени: $\sigma(t) = \Delta c_{вых}(t)/c_0$. Представленный на рис. 5.29 график изменения $\sigma(t)$ по времени (от σ_0 до σ_1) при скачкообразном входном возмущении называется *кривой разгона* данного технологического объекта (смесителя), а аппроксимирующее уравнение – *уравнением кривой разгона*. Уравнение кривой разгона в определенной степени можно рассматривать как характеристику данного технологического объекта (смесителя) при заданной функции возмущающего воздействия.

Пример. Найти уравнение кривой разгона для некоторого абстрактного смесителя, динамическая характеристика которого описывается следующим дифференциальным уравнением (в теории автоматизированного управления – статическим объектом первого порядка):

$$\frac{dc_{вых}}{dt} + \frac{1}{T_0} c_{вых} = \frac{K}{T_0} a_{вх};\ c_{вх} = c_{вх}(0) \times 1(t), \qquad (5.23)$$

где T_0 – постоянная величина объекта; $T_0 = \text{const}$; K – передаточный коэффициент или коэффициент усиления или уменьшения; $K = \text{const}$.

Величина T_0 характеризует среднее время, в течение которого каждый элементарный объем из потока смешиваемого материала удерживается в объекте регулирования (аналог среднего времени пребывания вещества в аппарате). Чем больше T_0, тем более инерционным является объект и тем, следовательно, труднее его регулировать.

По правилам операционного преобразования по Лапласу из уравнения (5.23) получим

$$L\left\{\frac{dx_{вых}(t)}{dt}\right\} = px_{вых}(p);\ L\left\{\frac{1}{T_0} x_{вых}(t)\right\} = \frac{1}{T_0} x_{вых}(p);$$

$$L\left\{\frac{K}{T_0} x_{вх}(t)\right\} = \frac{K}{T_0} x_{вх}(p);$$

$$L\{x_{вх}(t)\} = \frac{x_{вх}(0)}{p}.$$

В результате уравнение (5.23) примет вид

$$x_{вых}(p) = W(p)x_{вх}(0), \qquad (5.24)$$

где $W(p) = \dfrac{K}{p(1+pT_0)}$ – передаточная функция.

Оригинал выражения (5.24) находим по табл. 5.4 (позиция 2).

$$x_{вых}(t) = Kx_{вх}(0)\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right).$$

Таблица 5.4

Преобразование по Лапласу некоторых функций

Номер позиции	Оригинал	Изображение
1	$1(t) = \begin{cases} 0, t < 0 \\ 1, t \geq 0 \end{cases}$	$\dfrac{1}{p}$
2	t	$\dfrac{1}{p^2}$
3	$\dfrac{1}{T}e^{-\frac{t}{T}}$	$\dfrac{1}{1+Tp}$
4	$1 - e^{-\frac{t}{T}}$	$\dfrac{1}{p(1+Tp)}$

Таким образом, в рассматриваемом объекте не только масштаб проходящего сигнала (возмущения) изменяется в K раз, но и искажается его форма в динамическом режиме работы вследствие присущей этому объекту инертности.

Смесители периодического действия. В производстве ПВВ, как и в других химических производствах, используются в основном смесите-

ли периодического действия. Это связано с тем, что, во-первых, при периодическом ведении процесса смешивания можно обеспечить точное соотношение между компонентами смеси, а во-вторых, при относительно большом числе компонентов их дозирование в смеситель весьма затруднено.

По механике переноса вещества смесители периодического действия можно разделить на объемные смесители (барабанные, ленточные и плужные); смесители с перемешивающими устройствами (циркуляционные смесители); смесители с ожиженным слоем материала (смесители диффузионного смешивания).

В объемных смесителях смешиваемые компоненты перемещаются рабочими поверхностями корпуса или мешалки по всему внутреннему рабочему объему отдельными блоками, хаотически. Блоки из частиц одного компонента, попадая под действие лопастей мешалки или увлекающего движения корпуса смесителя, распадаются на части, которые затем разносятся по рабочему объему смесителя. Процесс смешивания блоков и их перераспределение в пространстве в конечном итоге приводят к смешиванию компонентов.

В объемных смесителях скорость процесса смешивания зависит в основном от количества одновременно существующих поверхностей сдвига в массе сыпучего материала и скорости относительного перемещения материала в месте сдвига.

В барабанных смесителях отсутствуют перемешивающие устройства, и процесс смешивания компонентов смеси происходит за счет вращения корпуса (рис. 5.30).

Простейший смеситель (рис. 5.30, *а*) представляет собой цилиндрический барабан, расположенный горизонтально, с цапфами на концах. Ось вращения барабана располагается горизонтально или наклонно к образующей (рис. 5.30, *б*, *г*), в плоскости, перпендикулярной к образующей барабана (рис. 5.30, *в*), или в плоскости образующих барабана (рис. 5.30, *а*, *д*, *е*).

Смеситель *V*-образной формы (см. рис. 5.30, *г*), состоящий из двух цилиндров, установленных под углом 90°, обеспечивает качественное смешивание материала за счет его периодического разделения на две части и интенсивного встряхивания при вращении барабана.

Барабанный смеситель с цапфами, расположенными по диагонали цилиндра (см. рис. 5.30, *б*), еще известный как «пьяная бочка», обеспечивает более качественное смешивание материала, чем упомянутые выше смесители.

Для интенсификации процесса смешивания применяют также комбинированное вращение цилиндра-чаши (рис. 5.30, *ж*).

Смесительные барабаны устанавливают в цапфы, в которые монтируют подшипники качения или скольжения. Цилиндрические горизонтальные барабаны можно устанавливать, кроме того, и на опорные

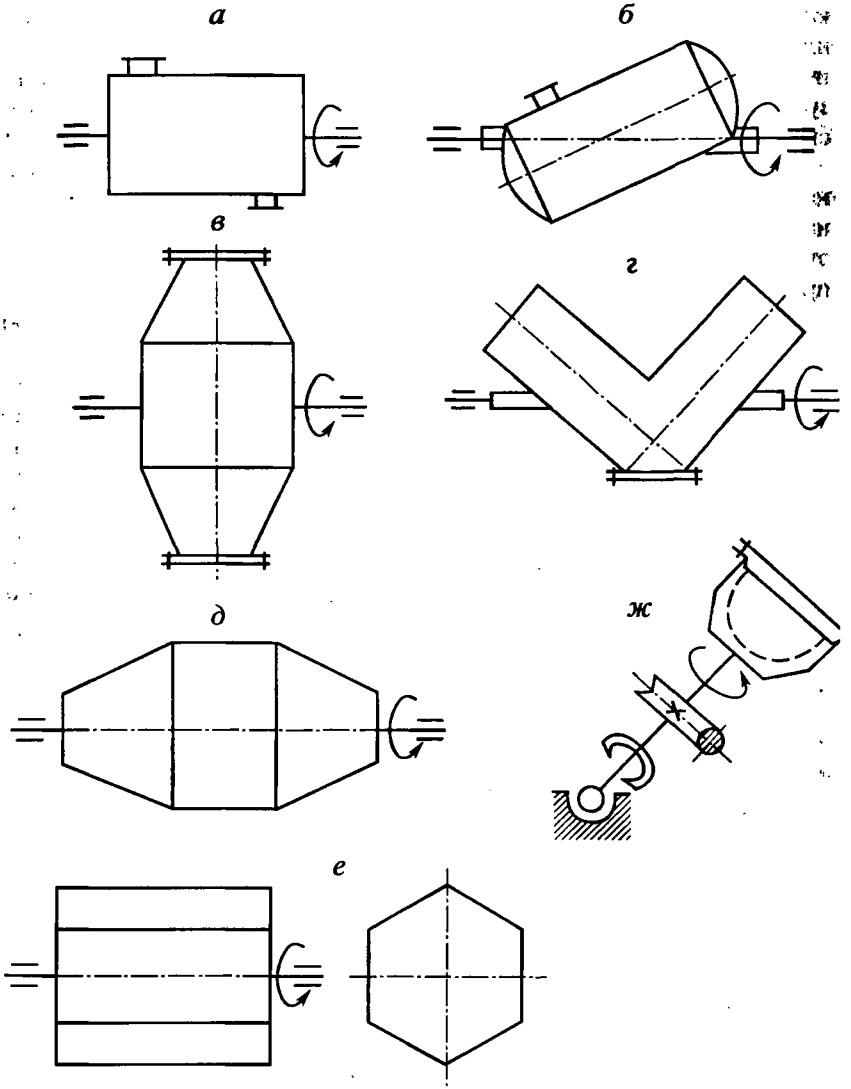


Рис. 5.30. Схемы барабанных смесителей без перемешивающих устройств

катки (ролики). В последнем случае на корпус барабана жестко закрепляют два бандажа, которые опираются на ролики. Один из бандажей имеет венцовую зубчатую шестерню, находящуюся в зацеплении с зубчатым колесом приводного вала. Приводной вал через редуктор связан с электродвигателем.

В производстве ПВВ из перечисленных барабанных смесителей наибольшее применение нашли различные конструкции смесителей, изготовленные по схемам на рис. 5.30, *а*, *б* [10]. Именно на смесителях этого типа была экспериментально проверена большая часть теорий процесса смешивания сыпучих материалов.

Барабанные смесители относятся к тихоходным машинам; линейная скорость вращения барабана обычно составляет 0,17–1 м/с.

В промышленности используют барабанные смесители зарубежных фирм типа «Турбола». В этих смесителях используется корпус (контейнер) любой формы, закрепляемый в зажимах, которые вращаются в трех плоскостях. Они предназначены для качественного смешивания сухих порошкообразных и зернистых сыпучих материалов.

В ленточных смесителях объемного смешивания рабочим органом является вращающаяся спиральная лента (одна или две). Ленточный смеситель состоит из следующих основных узлов (рис. 5.31): корпуса *1*; ротора, состоящего из спиральной ленты *3* большого диаметра и

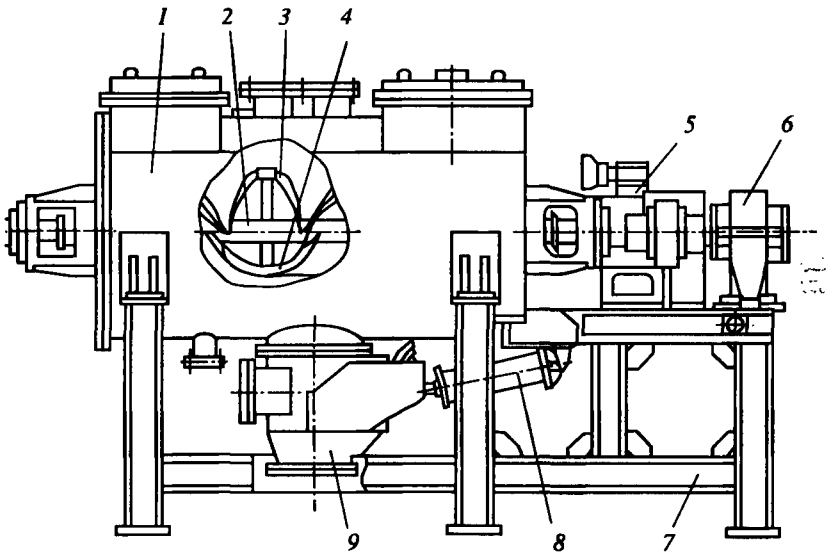


Рис. 5.31. Ленточный смеситель

спиральной ленты *4* малого диаметра; приводного вала *2* с подшипниковыми опорами; привода ротора, состоящего из электродвигателя *5* и редуктора *6*; сварной станины *7*; разгрузочной коробки *9* с клапаном, приводимым в действие рычажным механизмом от пневмоцилиндра *8*. Спиральные ленты разделены на две части: право- и левозаходную. В процессе работы спиральная лента большого диаметра перемещает материал в центральную часть корпуса, а спиральная лента меньшего диаметра – к его торцам. Корпус смесителя цилиндрической формы имеет плоскую крышку в верхней части. На ней находятся люки для осмотра и чистки внутренней части смесителя и технологические штуцера (для загрузки компонентов смеси, установки разрывной мембраны и др.). Выпуск готовой смеси обеспечивается через разгрузочную коробку *9*.

Ленточные смесители рекомендуются для смешивания сыпучих материалов с насыпной плотностью $\rho_н \leqslant 1500$ кг/м^3, а также сыпучих материалов с небольшим количеством жидких компонентов, вводимых в распыленном состоянии, с получением готового продукта в виде сыпучей смеси. Изготовляются они в двух вариантах исполнения: для не коррозионной и взрывоопасной среды и для коррозионной и взрывоопасной среды.

Для циркуляционных смесителей характерно движение (циркуляция) основного потока смешиваемого материала по замкнутому контуру рабочего объема. Зона действия перемешивающего органа составляет незначительную долю общего рабочего объема смесителя.

К наиболее распространенным циркуляционным смесителям следует отнести планетарно-шнековый, планетарно-лопастной и центробежный лопастной.

Планетарно-шнековый смеситель (рис. 5.32) состоит из следующих основных частей: конического корпуса *5*, крышки *3*, привода *2* шнека, привода *1* водила, шнека *6*, узла *4* крепления смесителя, запорного механизма *9* и разгрузочного короба *8*. Шнек *6*, получающий вращение вокруг собственной оси и оси корпуса от электродвигателя через две пары конических шестерен (находятся в коробках передач *1* и *2*), совершает планетарное вращение вокруг оси корпуса смесителя. Приводы шнека и водила смонтированы на крышке *3* корпуса смесителя (возможны и другие варианты крепления привода смесителя). Крышка имеет ряд технологических штуцеров для загрузки компонентов смеси, подачи инертного газа, установки взрывной мембраны, отбора проб, установки термопар, смотрового люка и т.п. Для открытия и закрытия разгрузочного клапана предназначен механизм *7*, состоящий из пневмо- или гидроцилиндра и рычажной передачи.

Смеситель работает следующим образом. При планетарном вращении шнека смешиваемый материал поднимается витками шнека вверх около стенок корпуса, затем материал движется к оси корпуса, где об-

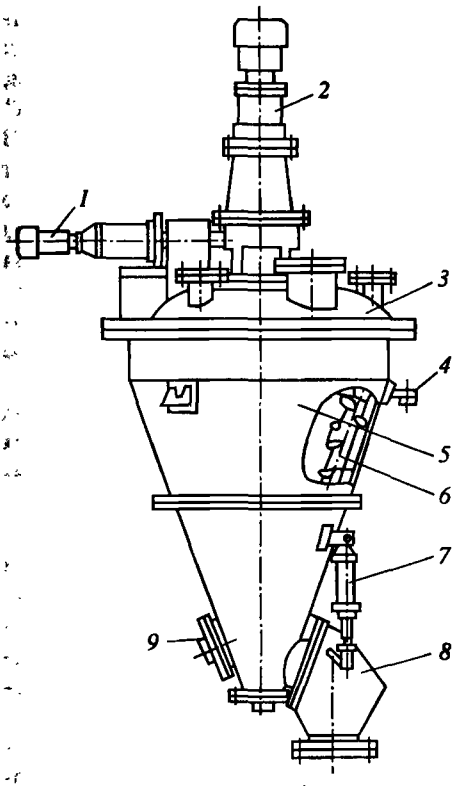


Рис. 5.32. Схема планетарно-шнекового смесителя

разуется нисходящий поток материала. В узкой части конического корпуса материал снова захватывается витками шнека и транспортируется вверх. После завершения процесса смешивания и открытия выгрузного клапана начинается истечение сыпучего материала в приемное устройство. Выпуск готовой смеси может производиться при вращающемся шнеке.

Экспериментально установлены следующие оптимальные геометрические и режимные параметры планетарно-шнековых смесителей: $d_ш = 0{,}2D$; $t_ш/d_ш = 1 \div 2$; $\varphi = 0{,}8$; $\omega_ш/\omega_в = 40$; $u = 1$ м/с; $t_{см} = 20$ мин. Здесь $d_ш$ – наибольший диаметр витков шнека; D – наибольший внутренний диаметр корпуса; $t_ш$ – шаг шнека; φ – коэффициент заполнения корпуса материалом; $\omega_ш$, $\omega_в$ – угловые скорости вращения шнека и водила; u – окружная скорость наружной кромки шнека вокруг оси шнека; α – угол конусности корпуса; $t_{см}$ – время смешивания.

Мощность привода планетарного вращения шнека

$$N = 1{,}15\, C_1 \rho_н n_ш L_p^2 F_{уд} (4 \sin^2\alpha + 1), \qquad (5.25)$$

где C_1 – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств смеси (табл. 5.5); $\rho_н$ – насыпная плотность сыпучего материала, кг/м^3; $n_ш$ – частота вращения шнека вокруг собственности, мин$^{-1}$; L_p – часть длины шнека, находящаяся в смеси, м; $F_{уд}$ – удельная поверхность шнека, м^2/м; α – угол конусности корпуса, град.

Удельная поверхность шнека (в квадратных метрах на 1 м длины его рабочей зоны) $F_{уд} = (2F_1 + F_2)/t_ш$ (здесь F_1 и F_2 – площади поверхности соответственно одной стороны витка шнека и вала на длине в один шаг), м^2.

Таблица 5.5

Значения коэффициентов C_1–C_3 для некоторых сыпучих материалов

Материал	Насыпная плотность, кг/м^3	Дисперсность частиц, мм	$C_1 \cdot 10^6$	$C_2 \cdot 10^4$	$C_3 \cdot 10^6$
Хлорид натрия	1100	0,01–0,20	2,50	2,68	4,10
	1070	1,0–2,0	1,27	39,0	–
	970	0,20–0,50	0,90	3,40	5,50
Гранулированный графит	1070	0,20–0,50	0,80	38,0	8,80
Кальцинированная сода	505	0,01–0,10	2,30	2,24	3,80

Планетарно-шнековые смесители выпускаются с одной планетарной шнековой мешалкой и двумя шнековыми мешалками. Изготовляются они в нескольких конструктивных исполнениях: для не коррозионных и невзрывоопасных смесей; для коррозионных и невзрывоопасных смесей; для не коррозионных и взрывоопасных смесей; для коррозионных и взрывоопасных смесей.

В планетарно-лопастных смесителях в отличие от рассмотренной конструкции планетарно-шнековых смесителей в качестве рабочих органов используются рамные или якорные мешалки, совершающие относительное вращение вокруг своей оси и переносное окружное движение вокруг оси цилиндрического корпуса смесителя.

Центробежные лопастные смесители относятся к циркуляционным смесителям с быстровращающимся рабочим органом, переводящим смешиваемый материал в псевдоожиженное состояние при окружной скорости края лопасти более 6 м/с. В качестве рабочего органа в них используются мешалки, выполненные в виде радиальных лопастей, пропеллеров, дисков.

Центробежные смесители предназначены для смешивания сыпучих материалов с насыпной плотностью $\rho_н \leqslant 1300$ кг/м^3, а также сыпучих и жидких компонентов при условии, что смесь остается в сыпучем состоянии. При времени смешивания 15–30 мин для многих смесей достижимо качество смешивания с коэффициентом неоднородности $V_c = 1{,}5 \div 2\%$.

Центробежный лопастной смеситель (рис. 5.33) состоит из следующих основных узлов: вертикального цилиндрического корпуса *1* с рубашкой для термостатирования, крышки *2*, рабочего органа с верхней *3* и нижней *4* лопастными мешалками, электродвигателя *5*, вращающего вала мешалок через клиноременный привод *6* и станины *7*. В нижней части корпуса крепится разгрузочный патрубок *8* с пневмозатвором *9*. На крышке имеются технологические штуцера для загрузки компонентов смеси, установки разрывной мембраны и др.

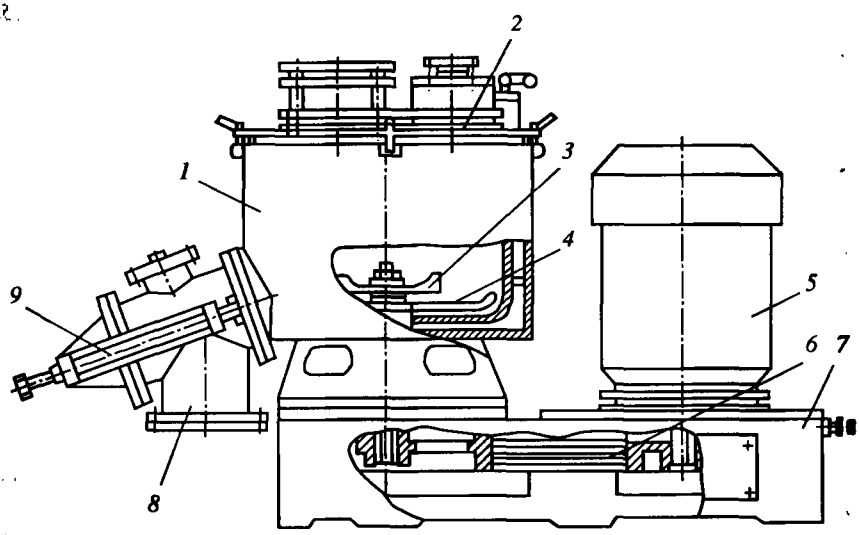


Рис. 5.33. Схема центробежного лопастного смесителя

Смесители выпускаются во взрывозащитном исполнении из коррозионностойкой стали; рабочая температура в смесительной камере и в рубашке –20 ... + 160 °С.

Экспериментально установлены следующие оптимальные геометрические параметры смесителя: высота смесительной камеры $H = (0{,}7 \div 0{,}9)D$ (здесь D – диаметр смесительной камеры, определяемый с учетом полного объема $V_п$ смесителя по формуле $D = 1{,}15\sqrt[3]{V_п}$); диаметр верхней лопасти $d_{в.л} = (0{,}85 \div 0{,}90)D$; диаметр нижней лопасти $d_{н.л} = (0{,}85 \div 0{,}95)D$; расстояние между нижней и верхней лопастями $h = 0{,}12D$; высота лопастей $b = (0{,}13 \div 0{,}15)D$.

Мощность привода центробежного лопастного смесителя

$$N = C_2 K_ф \rho_н (L\omega)^2 H_c^{0,63} b^{0,6} S^{0,2} \sin\alpha, \qquad (5.26)$$

где C_2 – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств смешиваемого материала (см. табл. 5.5); $K_ф$ – коэффициент формы лопастей мешалки (для прямых лопастей $K_ф = 1$, спиральных – $K_ф = 1{,}06$, ножевых – $K_ф = 0{,}72$); L – длина мешалки, м; ω – угловая частота вращения мешалки, $с^{-1}$; H_c – высота слоя материала над лопастью, м; b – высота мешалки, м; S – радиальный зазор между краем лопасти мешалки и стенкой корпуса, м; α – угол наклона лопастей мешалки к горизонтали, град.

В центробежных волчковых смесителях рабочим органом является вращающийся полый усеченный конус с донышком и двумя симмет-

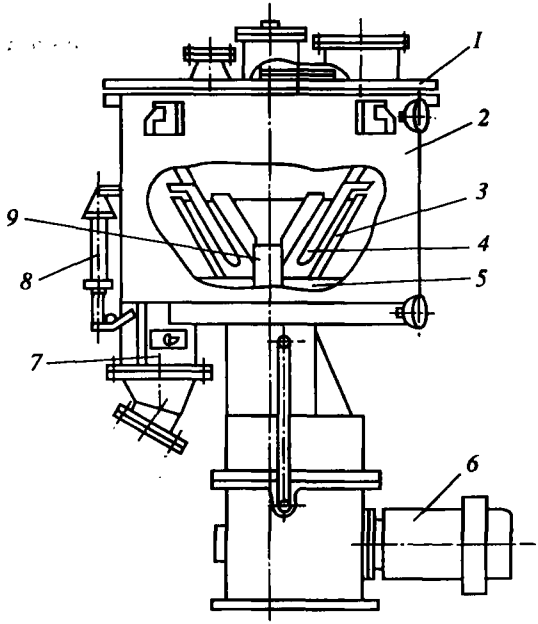


Рис. 5.34. Схема центробежного волчкового смесителя

рично расположенными в его нижней части окнами. Благодаря вращающемуся конусу сыпучий материал циркулирует внутри корпуса.

Центробежный волчковый смеситель (рис. 5.34) состоит из следующих основных узлов: корпуса *2* цилиндрической формы с рубашкой для нагрева или охлаждения смеси; ротора *3* со скребками серповидной формы *5*; электродвигателя *6* для привода ротора во вращение; очистных скребков *4*; разгрузочной камеры *7* с пневматическим затвором *8*; крышки *1* с технологическими штуцерами (для загрузки компонентов смеси, установки разрывной мембраны, смотрового окна и др.). Ротор закреплен на консольном приводном валу *9*.

Сыпучий материал, попавший в конус при загрузке, под влиянием центробежных сил начинает двигаться по внутренней поверхности конуса вверх, а затем сбрасывается в кольцевое пространство между конусом и корпусом смесителя. Новые порции сыпучего материала поступают внутрь конуса из кольцевого пространства через окна, находящиеся в нижней его части. Серповидная лопастная мешалка, приваренная к донышку ротора, увеличивает подвижность частиц сыпучего материала в нижней смесительной камере и способствует их потоку через окна в конусе. Материал смешивается как при подъеме частиц по конусу, так и вне конуса вследствие их перераспределения во время

отскока от стенок корпуса, опускания вниз по кольцевому пространству и в зоне работы серповидной лопасти. Для очистки внутренней поверхности конуса и смесительной камеры предусмотрены скребки *4*, закрепленные на свободно подвешенной раме. Вал рамы закреплен в подшипниковом узле, который установлен на крышке *1*. Скребки *4* вместе с рамой получают вращательное движение от потока сыпучего материала, увлекаемого вращающимся ротором. Частота вращения рамы, которая должна быть намного меньше частоты вращения ротора, регулируется тормозным устройством, расположенным на крышке 1 смесителя.

Центробежные волчковые смесители предназначены для смешивания сыпучих материалов с насыпной плотностью $\rho_н \leqslant 1700$ кг/м^3.

Экспериментально установлены следующие оптимальные геометрические и режимные параметры: угол раструба конуса $\alpha = 60°$; коэффициент заполнения смесительной камеры $\varphi = 0{,}8$; $\omega^2 R = 200 \div 300$ м/с^2 (здесь ω – угловая частота вращения ротора, с$^{-1}$, R – наружный радиус конуса, м). Достижимая однородность смесей $V_c = 1{,}5 \div 2\%$.

Мощность привода центробежного волчкового смесителя

$$N = 1{,}25 C_3 K_ф \rho_н L \omega^{1{,}65} H_c b^{0{,}6}, \qquad (5.27)$$

где C_3 – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств смеси (см. табл. 5.5); $K_ф$ – коэффициент формы лопастей мешалки ротора (для спиральных лопастей $K_ф = 0{,}7$, для прямых – $K_ф = 1$); L – размах лопастей мешалки, м; остальные обозначения см. (5.26).

Смесители непрерывного действия. Такие аппараты обладают высокой производительностью, позволяют полностью автоматизировать процесс смешивания, имеют небольшие энерго- и металлоемкости.

Непрерывно действующие смесители позволяют также выполнять несколько процессов одновременно, например: смешивание и гранулирование; смешивание, гранулирование и сушку; смешивание, гранулирование и классификацию; смешивание и измельчение и т.п. Однако при всех своих преимуществах по сравнению со смесителями периодического действия они не получили еще достойного применения в промышленности из-за сложности дозирования потоков сыпучих материалов в строго заданных количествах. Поэтому они практически не используются для приготовления многокомпонентных смесей и смесей высокой однородности.

Среди смесителей непрерывного действия наиболее распространены барабанные и червячно-лопастные.

Барабанные смесители обеспечивают смешивание загружаемых компонентов за счет вращения корпуса цилиндрической формы, ось которого имеет небольшой угол наклона к горизонтали (примерно 4°). Такой смеситель состоит из следующих основных элементов

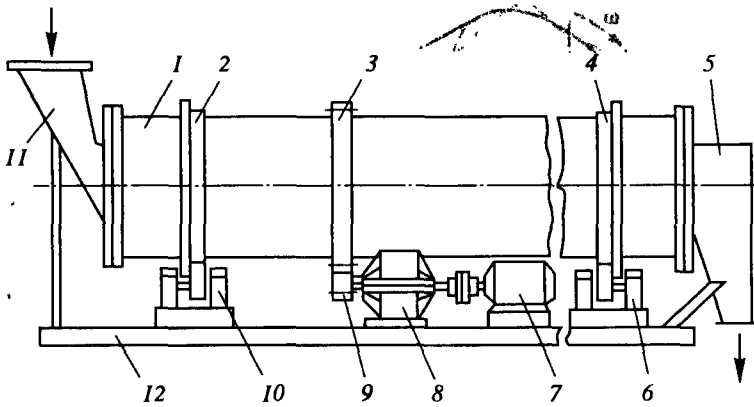


Рис. 5.35. Схема барабанного смесителя непрерывного действия

(рис. 5.35): корпуса *1*, на котором закреплены бандажи *2* и *4* и венцовое зубчатое колесо *3*; опорных станций *6* и *10*, предназначенных для опирания корпуса на роликах и фиксации его в горизонтальном направлении; привода корпуса, состоящего из электродвигателя *7*, редуктора *8* и малой шестерни *9*; наклонного желоба *11*, предназначенного для подачи в смеситель смешиваемых материалов; разгрузочной камеры *5*; станины *12*. Для поддержания необходимого уровня материала внутри корпуса в конце его вваривают подпорное кольцо, через которое материал попадает в разгрузочную камеру *5*.

В барабанных смесителях рекомендуют поддерживать каскадный режим движения материала в корпусе. При этом режиме частицы материала, находящиеся в глубине слоя, движутся по круговым траекториям вплоть до выхода на поверхность в верхней части ската, образованного свободной поверхностью слоя смешиваемого материала. После выхода частиц на поверхность слоя они скатываются по склону. Вся верхняя часть ската представляет собой слой небольшой толщины, состоящий из хаотически движущихся вниз частиц. Именно в этом тонком слое и происходит в основном процесс смешивания частиц.

Каскадный режим движения частиц достигается при угловой частоте вращения корпуса $\omega < \omega_{кр}$ (здесь $\omega_{кр}$ – критическая частота вращения корпуса, при которой частицы прижимаются к его стенке – см. подразд. 5.1). При этом длину L корпуса барабанного смесителя принимают с учетом его диаметра D: $L = (3 \div 6)D$.

В барабанном смесителе без внутренних устройств слой сыпучего материала делится на две зоны (рис. 5.36). Ниже поверхности раздела $NDLL'D'N'$ находится зона подъема материала, в которой материал поднимается вместе с барабаном, без заметного проскальзывания слоев и относительного смещения частиц сыпучего материала. Выше по-

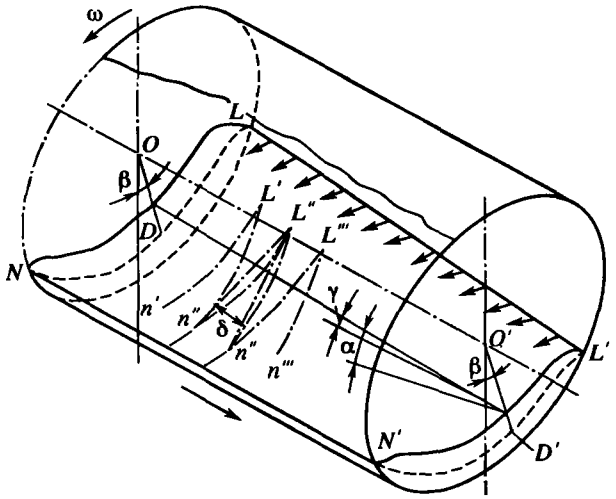


Рис. 5.36. Схема движения материала во вращающемся барабане

верхности раздела образуется зона скатывания. В этой зоне частицы смещаются *по линиям скольжения* – линиям, по которым частицы на криволинейной поверхности под действием сил гравитации взаимно перемещаются и перемешиваются. Практически процессы тепло- и массообмена происходят только в зоне скатывания. При этом их интенсивность обусловлена размерами зоны, частотой входа частиц в эту зону, порозностью материала в зоне, физико-механическими свойствами и т.д. Перемещение материала от загрузочного сечения барабана к разгрузочному сечению происходит по кривой $n'L' \ldots n'''L'''$ пути, проходимого каждой частицей материала.

Основные параметры расположения сыпучего материала при плоской свободной поверхности: угол охвата барабана сыпучей массой (δ), угол наклона оси барабана (α), угол подъема центра массы сегмента сыпучего материала в поперечном сечении барабана (β), угол естественного откоса сыпучего материала (φ), угол наклона свободной поверхности сыпучего материала к продольной оси барабана (γ) представлены на рис. 5.36 и 5.37.

Поднимающийся материал имеет в поперечном сечении поверхность кругового сегмента *EDFM* (рис. 5.37), а скатывающийся – *ELKNF*. Линия раздела зон подъема и скатывания наклонена к горизонту под углом, равным динамическому углу естественного откоса φ. Это обусловлено тем, что поверхность формируется силами гравитации, а центробежные силы относительно малы.

Производительность барабанных смесителей рассчитывается следующим образом. Для барабанов, работающих в режиме пересыпания

без внутренних устройств, из анализа движения сыпучего материала по схеме (см. рис. 5.37) из предложенных рядом авторов выражений [14] для расчета массовой производительности наибольшее распространение получила формула

$$Q = \frac{1}{12}\omega D^3 \rho \sin^3\left(\frac{\delta_{ср}}{2}\right)\mathrm{tg}\varepsilon, \qquad (5.28)$$

где ρ – плотность сыпучего материала, $\delta_{ср}$ – угол охвата сыпучей массы (центральный угол сегмента загрузки), соответствующий среднему коэффициенту заполнения $k_з$; $\mathrm{tg}\varepsilon$ – тангенс угла, рассчитываемого как $\dfrac{\mathrm{tg}\alpha + \gamma\cos\varphi}{\sin\varphi}$.

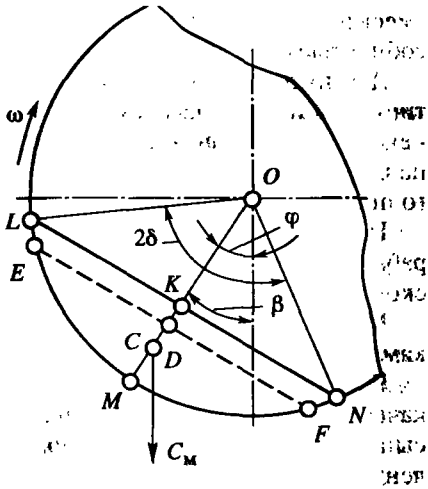


Рис. 5.37. Поперечное сечение барабана

Время пребывания материала в барабане

$$t = \frac{3}{2}\frac{D}{L}\frac{\delta_{ср} - \sin\delta_{ср}}{\omega\sin^3\delta_{ср}\mathrm{tg}\varepsilon}. \qquad (5.29)$$

Входящие в выражения (5.28) и (5.29) параметры расположения сыпучего материала в барабане (γ, $\delta_{ср}$) определяются на модельных установках, в которых реализуется подобие процессов движения материала для модели и промышленной установки. Принцип подобия соблюдается при условии постоянства геометрического подобия и относительной производительности: $L/D = L'/D' = \mathrm{const}$; $W/(FV_{ок}) = W'/(F'V'_{ок}) = \mathrm{const}$ (здесь W и W' – объемные производительности; F и F' – площади сегмента загрузки; $V_{ок}$ и $V'_{ок}$ – окружные скорости (соответственно промышленной установки и модели).

Определенные на модели параметры γ и $\delta_{ср}$ являются расчетными для проектируемого барабана. Выражения (5.28) и (5.29) имеют общий недостаток, заключающийся в том, что их практическое использование невозможно в проектных расчетах без предварительного определения указанных параметров расположения сыпучего материала в барабане.

Сыпучие материалы можно подавать в смеситель непрерывно или порционно. Последнее возможно благодаря тому, что барабанный

смеситель обладает высокой инертностью, т.е. «сглаживающей способностью».

Для интенсификации процесса смешивания внутри корпуса монтируют винтовую насадку, состоящую из спиральных лент и уголков. В некоторых барабанных смесителях внутри нижней части корпуса устанавливают шнек или лопастной вал, вращающийся от индивидуального привода и выполняющий ту же функцию, что и винтовая насадка.

Производительность и время пребывания сыпучего материала в барабанах с внутренними устройствами можно оценить по эмпирической зависимости, приведенной в [6, 14].

Мощность привода барабанных смесителей с внутренними насадками и без них рассчитывают по методике, изложенной в [6].

Червячно-лопастные смесители бывают одно- и двухвальными. В качестве рабочих органов, выполняющих смешивание и перемещение сыпучего материала вдоль корпуса, используют лопатки, винтовые ленты, спирали, шнеки. Сечение корпуса может иметь цилиндрическую, корытообразную, овальную, перевернутой восмерки форму. В двухвальном смесителе валы могут вращаться в одном направлении или навстречу один другому.

Червячно-лопастной смеситель (рис. 5.38) состоит из горизонтального корпуса *1* корытообразной формы, установленного на раме *5* и

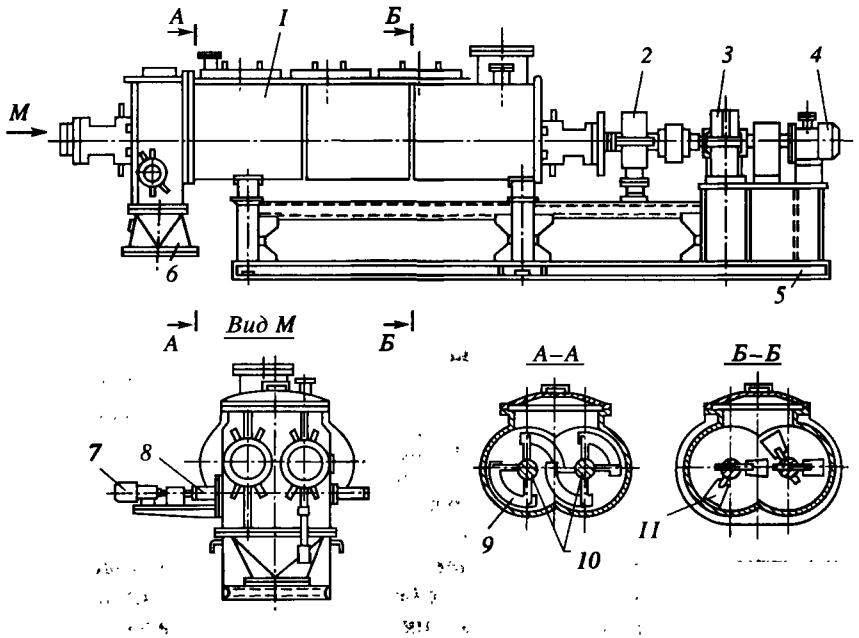


Рис. 5.38. Схема червячно-лопастного смесителя

заканчивающегося разгрузочной камерой *6*. Внутри корпуса размещены два вала *10* с рабочими элементами, представляющими собой лопатки *11*, спиральные ленты *9* и скребки. Лопатки монтируются на валах по винтовой линии. В конце корпуса ряды лопаток продолжены спиральными лентами, ускоряющими продольное движение материала к разгрузочной камере. Валы приводятся во вращение электродвигателем *4* через редуктор *3*, муфту и зубчатую пару *2*. В разгрузочной камере установлен рыхлитель *8*; вал рыхлителя соединен с электродвигателем *7*. Компоненты смеси поступают в смесительную камеру через штуцера, расположенные в верхней части корпуса вблизи правого торца, а выгружается смесь через клапан разгрузочной камеры.

Червячно-лопастные смесители рекомендуются для смешивания сыпучих материалов с насыпной плотностью $\rho_н \leqslant 1500$ кг/м^3, а также сыпучих материалов с небольшим количеством жидких компонентов при условии, что готовая смесь сохраняет сыпучесть.

Отдельные модификации смесителей этого типа выпускаются для работы с коррозионно- и взрывоопасными материалами.

Дополнительные сведения о смесителях сыпучих материалов можно найти в работах [5, 6].

5.4. Специальное оборудование [15]

Оборудование для подготовки сыпучих составов ВВ. В данном подразделе рассматриваются конструкции оборудования, используемого для приготовления ПВВ вблизи пунктов его применения (рудников, карьеров, шахт и т.п.). Отличительными особенностями этого оборудования являются мобильность и работа как по циклической, так и непрерывной схемам, простота в конструкции и ремонте при сохранении безопасности эксплуатации.

Установки, в которых одновременно осуществляются операции разрезания мешков, содержащих ВВ, просеивания, дробления и загрузки ВВ в бункеры-накопители или в смесительно-зарядные машины, получили название – установки растаривания.

Установка растаривания вибрационная (УРВ) служит для растаривания гранулированных ВВ и аммиачной селитры, выпускаемых в стандартной упаковке. Она представляет собой вибрационный конвейер с эксцентриковым приводом (рис. 5.39), состоящим из лотка корытчатой формы *1*, на котором закреплен нож *2*. В средней части лотка имеется окно *3*, под которым расположено сито *4* и одна из щек *5* дробилки. Вторая щека 6 крепится к раме противовеса *7*. Лоток с ситом смонтирован на кронштейнах *14* рамы установки *13* с помощью коромысла 9 и пластинчатых рессор *8*. На раме противовеса установлен эксцентриковый привод *12*, передающий вибрацию на лоток *1* через шатун *11*.

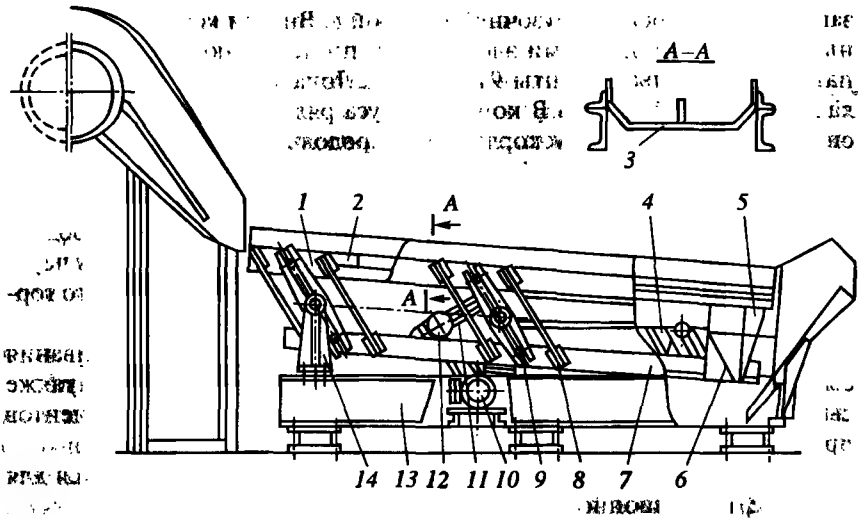


Рис. 5.39. Установка растаривания вибрационная

Мешок с ВВ, попадая на лоток *1* под действием вибрационных направленных колебаний, движется через нож *2* и разрезается; ВВ или аммиачная селитра высыпается на сито *4*. Мелкая фракция, пройдя сито, попадает в бункер-накопитель. Крупные куски попадают в дробилку *5*, *6*, а оттуда в бункер-накопитель.

Техническая характеристика УРВ-2

Производительность, т/ч	≤25
Амплитуда колебаний лотка, мм	3
Частота колебаний, мин$^{-1}$	900
Число ножей	1
Угол, град:	
вибрации	30
наклона лотка	7
Скорость транспортирования лотка, м/с	0,2
Вид дробилки	щековая
Предел регулирования зазора между щеками, мм	3–20
Электродвигатель ВАО 32-4:	
мощность, кВт	3
частота вращения, мин$^{-1}$	1425
Основные размеры, мм:	
длина	4500
ширина	1000
высота	1230
Масса, кг	1160

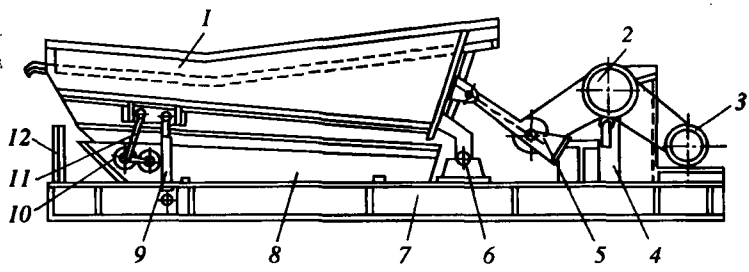


Рис. 5.40. Установка растаривания качающаяся

Установка растаривания качающаяся (УРК) состоит из рамы *7* (рис. 5.40), подвижного *1* и неподвижного *8* бункеров, дробильного устройства *10*, опорных подшипников *6* эксцентрикового *2* и промежуточного *5* валов, амортизаторов *9*, ограничительной стойки *12*, натяжного устройства *4*, электродвигателя во взрывобезопасном исполнении *3*. Подвижный бункер состоит из корпуса, направляющей и наклонной сеток; он крепится к раме посредством амортизаторов, опорных подшипников и эксцентрикового привода, который сообщает бункеру колебательные движения.

Дробильное устройство качающееся, челюстного типа, смонтировано в неподвижном бункере на осях, концы которых закреплены в подшипниках. Возвратно-поступательное движение челюстей измельчающего устройства осуществляется посредством тяг *11*, соединенных с подвижным бункером с помощью гибких опор.

Работает установка следующим образом. Вращение от электродвигателя посредством текстропной передачи передается на эксцентриковый привод, преобразующий вращательное движение в возвратно-поступательные качающиеся перемещения подвижного бункера. Из разрезанного мешка, передвигающегося по направляющим подвижного бункера, за счет качающихся движений высыпается гранулированное ВВ, которое проходит сетку и направляется в бункер-накопитель. Крупные куски, не прошедшие через наклонную сетку, направляются в дробильное устройство, а затем в бункер-накопитель.

Техническая характеристика УРК

Производительность, т/ч	25
Частота колебаний, мин$^{-1}$	12
Амплитуда колебаний, мм	90
Мощность электродвигателя, кВт	3
Основные размеры, мм:	
длина	4200
ширина	740
высота	1300
Масса, кг	630

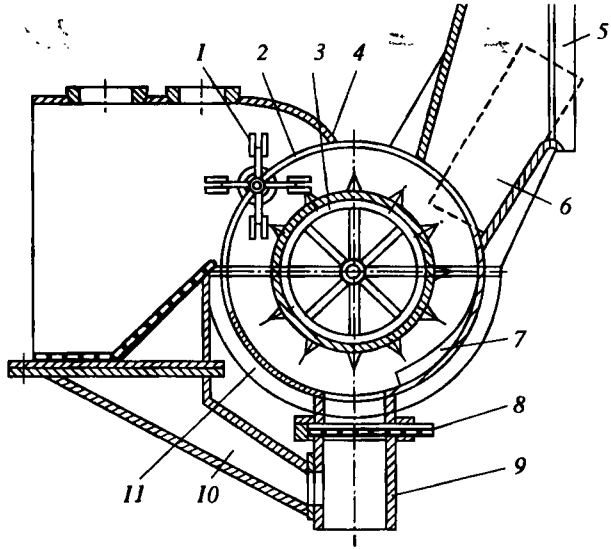


Рис. 5.41. Установка погрузочно-растаривающая

Установка погрузочно-растаривающая (УПР) осуществляет растаривание гранулированных ВВ, находящихся в бумажной мешкотаре, накопление ВВ в бункере-накопителе или загрузку взрывчатого вещества в транспортно-смесительную машину.

Растаривающий орган установки (рис. 5.41) представляет собой сварную конструкцию барабанного типа, выполненную из нержавеющей стали. Он состоит из корпуса *11*, крышки *2*, барабана с шипами *3*, выпускного патрубка *9*, отсекателя мешкотары *1*, кожуха *4* и воронки *10*. Корпус в нижней части имеет выходное отверстие, которое перекрывается решеткой *8*. К фланцам этого отверстия подсоединяется патрубок *9*. С помощью прижимов в корпусе закреплен нож *7*, разрезающий мешок по продольной оси. Крышка *2* сварной конструкции имеет со стороны подачи мешков с конвейера окно, закрытое шторкой *5*. Здесь же имеется фланец для соединения с трубопроводом пылеулавливающего устройства. Барабан *3* установлен на двух подшипниковых опорах, закрепленных в корпусе растаривающего устройства; вращение барабана осуществляет гидропривод (на рисунке не показан). По образующей барабана в шахматном порядке закреплены шипы, предназначенные для захвата мешков *6* с ВВ и подачи их на нож *7*.

Отсекатель *1* служит для съема мешкотары с шипов барабана и направления их на решетку кожуха *4*. Вал отсекателя оборудован четырьмя лопастями, выполненными из прорезиненной ленты. Частота вращения вала отсекателя 52 мин$^{-1}$.

Установка работает следующим образом. Мешки с ВВ с помощью конвейера поступают в приемный лоток растаривающего устройства; под действием силы тяжести они скользят по направляющей на вращающийся барабан. Захваченный шипами мешок разрезается ножом и гранулированные ВВ самотеком через решетку и патрубок поступают в бункер-накопитель. Порожние мешки лопастями отсекателя выбрасываются на сетку воронки, а затем по наклонному лотку направляются в бункер мешкотары. Число мешков, поступающих на конвейер, фиксируют счетчиком.

Техническая характеристика 1УПР-30

Производительность, т/ч 30
Частота вращения барабана, мин$^{-1}$ 10
Привод ..... гидравлический
Мощность привода, кВт 10

Оборудование для приготовления простейших ПВВ. Для приготовления игданитов используют установки, в которых совмещают процессы измельчения слежавшихся сыпучих материалов и последующего их смешивания с жидкими материалами, при котором смесь остается сыпучим телом.

Измельчитель-смеситель игданита (ИСИ) работает следующим образом (рис. 5.42). Аммиачную селитру засыпают в бункер-измельчитель *1*, где слежавшиеся куски рыхлят фрезами вращающейся тарели *2*. Далее через сито тарели АС поступает в камеру смешивания *3*, где

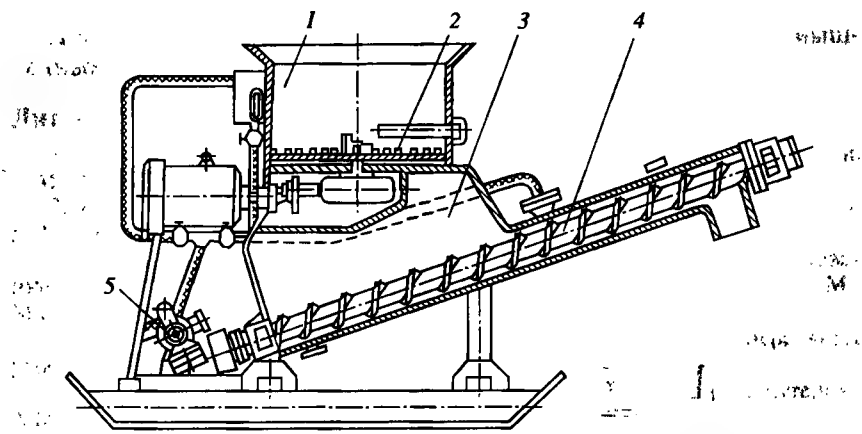


Рис. 5.42. Измельчитель-смеситель игданита

шнеком *4* перемешивается с дизельным топливом. Шнек и шестеренчатый насос *5* для подачи дизельного топлива приводятся во вращение одним электродвигателем, что обеспечивает их синхронную работу.

Техническая характеристика ИСИ-II

Производительность, т/ч:	
при циклической работе	0,6
при непрерывной работе	4
Вместимость, л:	
бункера-измельчителя	300
смесителя	400
дозатора дизельного топлива	7
Частота вращения шнека, $с^{-1}$	1,87
Мощность электродвигателя (суммарная), кВт:	11,5
измельчителя	7,5
смесителя	4
Масса, кг	1360

Установка для приготовления игданита (УИ) предназначена для приготовления игданита в стационарных условиях (рис. 5.43). Амми-

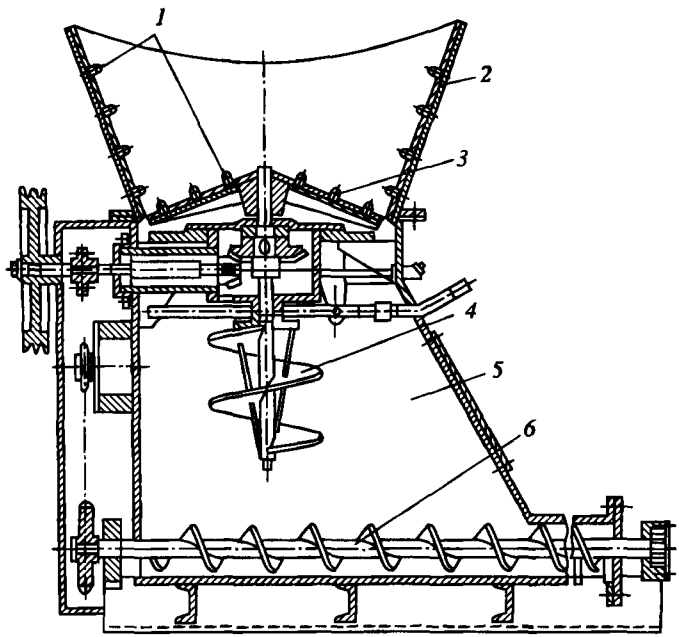


Рис. 5.43. Установка приготовления игданита

ачная селитра засыпается в приемную воронку *2*, поступает через зазор между воронкой и диском *3* в корпус *5*. Дизельное топливо подается в зону смешивания из расходного бачка самотеком через вентиль, который открывают одновременно с включением установки в работу.

При включении привода вращаются диск, шнек *4* и выгрузной шнек *6*, который транспортирует АС в сторону, противоположную от выгрузного люка. По истечении определенного времени приготовления ВВ перемешивание прекращают и включают тот же привод в реверсивное движение, при котором происходит выгрузка полученного игданита шнеком *6* в приемную емкость. Слежавшаяся АС дробится шинами *1* на диске и внутренней стенке воронки.

Техническая характеристика УИ-2

Производительность, т/ч:	
техническая	1,8
эксплуатационная	1
Вместимость установки, л	200
Время смешивания, мин	3
Частота вращения, $мин^{-1}$:	
диска и шнека смесителя	32
выгрузного шнека	73
Диаметр выгрузного шнека, мм	155
Вместимость бачка для дизельного топлива, л	15
Масса, кг	1150
Основные размеры, мм:	
длина	1940
высота	615
ширина	1835

Дополнительные сведения о механизации приготовления промышленных ВВ на местах их применения можно найти в [15].

Литература

1. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 750 с.

2. *Плановский А.Н., Николаев П.И.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1987. – 496 с.

3. *Бауман В.А., Клушанцев Б.В., Мартынов В.Д.* Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. – М.: Машиностроение, 1981. – 324 с.

4. *Генералов М.Б.* Расчет оборудования для гранулированных минеральных удобрений. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с.

5. Процессы и аппараты химической технологии. Т. 2; Под ред. Кутепова А.М. – М.: Центр «Интеграция», 2001. – 600 с.

6. Конструирование и расчет машин химических производств; Под ред. Кольмана-Иванова Э.Э. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с.

7. *Бауман В.А.* Роторные дробилки. – М.: Машиностроение, 1973. – 272 с.
8. Нестандартизованное оборудование производств спецхимии: Каталог. – М.: ЦНИИНТИ, 1985. – 67 с.
9. *Бауман В.А.* Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М.: Высшая школа, 1977. – 255 с.
10. *Фиошина М.А., Русин Д.Л.* Основы химии и технологии порохов и твердых ракетных топлив. – М.: РХТУ, 2001. – 316 с.
11. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 2; Под ред. Айнштейна В.Г. – М.: Центр «Интеграция», 2000. – 1760 с.
12. *Софиева Ю.Н., Софиев А.Э.* Теория управления. – М.: МГУИЭ, 2002. – 184 с.
13. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
14. *Генералов М.Б.* Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии. – Калуга: Изд. Н. Бочкаревой, 2002. – 592 с.
15. Механизация взрывных работ: Справочное пособие / А.М. Бейсабаев, И.Е. Ерофеев, А.А. Егупов и др. – М.: Недра, 1992. – 272 с.

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

6.1. Основные уравнения гидродинамики вязких жидкостей

Гидромеханические процессы в своем осуществлении и описании базируются на закономерностях переноса импульса (количества движения); изучение объектов, где они используются, связано с решением различных задача гидродинамики. Рассмотрим последовательно процессы перемешивания *жидких* и *жидкообразных смесей* (суспензий, эмульсий и т.п.) и диспергирования жидкостей.

В случае ламинарного движения вязких жидкостей, подчиняющихся реологическому закону течения ньютоновских сред (см. подразд. 2.6), уравнения переноса импульса (4.5)–(4.7) принимают следующий вид:

$$\left.\begin{aligned}
\rho\frac{dv_x}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\nabla^2 v_x + \rho g_x \\
\rho\frac{dv_y}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\nabla^2 v_y + \rho g_y \\
\rho\frac{dv_z}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\nabla^2 v_z + \rho g_z
\end{aligned}\right\}, \qquad (6.1)$$

где dv_i/dt ($i = x, y, z$) – полные (субстанциональные) производные;

$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_x}{\partial v} + v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}$; p – гидростатическое давление (среднее нормальное напряжение); $\nabla 2$ – оператор Лапласа; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial v^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; μ – коэффициент динамической вязкости; ρ – плотность среды; (g_x, g_y, g_z) – проекции вектора ускорения свободного падения на координатные оси.

Уравнения системы (6.1) получили название *уравнений Навье–Стокса*. Полное описание ламинарного движения вязких ньютоновских

жидкостей в общей форме возможно путем решения уравнений Навье–Стокса совместно с уравнением неразрывности (4.4). Однако пока не удалось решить эту сложную систему уравнений в общем виде; получены решения этой системы уравнений только для некоторых частных случаев.

Теория подобия позволяет преобразовать уравнения Навье–Стокса и получить из них некоторую общую функциональную зависимость между *критериями подобия*, характеризующими силы, действующие при движении вязкой жидкости.

Критерии подобия можно получить путем деления левой части дифференциального уравнения на правую его часть (или наоборот) и последующего отбрасывания знаков математических операторов.

Заменим в левой части одного из уравнений (6.1), характеризующей силу инерции, дифференциалы конечными величинами. Для случаев установившегося движения жидкости $\left(\frac{\partial v_x}{\partial t} = 0\right)$ находим

$$\rho\left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z}\right) \sim \rho v \frac{v}{l} = \frac{\rho v^2}{l},$$

где l – определяющий линейный размер.

В правой части уравнений (6.1) первые слагаемые типа $\partial p/\partial x$, характеризующие действие силы давления, можно заменить отношением p/l, т.е. $\partial p/\partial x \sim p/l$. Вторые слагаемые правой части, отражающие действие силы внутреннего трения,

$$\mu\left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}\right) \sim \frac{\mu v}{l^2}.$$

Третьи слагаемые, отражающие действие силы тяжести, представим как $\rho g_x \sim \rho g$.

Выразим полученные силы в относительных единицах, приняв за масштаб силу инерции. В результате получим следующие безразмерные соотношения величин – критериев подобия:

критерий Рейнольдса, $\mathrm{Re} = vl\rho/\mu$, отражающий влияние силы трения на движение жидкости;

критерий Фруда, $\mathrm{Fr} = v^2/(gl)$, отражающий влияние сил тяжести на движение жидкости;

критерий Эйлера, $\mathrm{Eu} = \Delta p/(\rho v^2)$, отражающий влияние перепада давления на движение жидкости.

В соответствии с теорией подобия полученные критерии представляют в виде функциональной зависимости

$$Eu = f(Fr, Re, l/d_э), \qquad (6.2)$$

где $l/d_э$ – симплекс геометрического подобия; l, $d_э$ – характерные размеры аппарата (соответственно длина и эквивалентный диаметр).

В случае нестационарного движения жидкости в функционал уравнения (6.2) необходимо добавить *критерий гомохронности* $Ho = vt/l$.

Как следует из теории подобия, некоторые физические величины, входящие в критерии подобия, целесообразно заменять на другие, им пропорциональные. Получаемые при этом видоизмененные критерии называют *модифицированными*.

В ряде случаев оказывается затруднительным или даже практически невозможным определить или вычислить ту или иную физическую величину, входящую в критерий подобия. Тогда эту величину исключают путем сочетания двух и большего числа критериев; в результате получают *производные критерии подобия*, составленные из основных, представленные в выражении (6.2). При этом исключенную величину обычно заменяют на другую, ей пропорциональную, опытное или расчетное определение которой является более простым.

Так, например, при естественной конвекции, возникающей под действием разности плотностей жидкости, очень трудно определить скорость конвективных течений. Эта скорость входит в критерий Фруда, отражающий подобие таких процессов. Поэтому исключают скорость путем сочетания критериев Рейнольдса и Фруда и получают критерий Галилея:

$$Ga = \frac{Re^2}{Fr} = \frac{l^3\rho^2 g}{\mu^2}.$$

Умножая критерий Галилея на разность плотностей жидкости в различных ее точках, выраженную в относительных единицах – $(\rho_0 - \rho)/\rho$ (эта разность является причиной возникновения конвективных токов), получают новый производный критерий – критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{l^3\rho^2 g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_0 - \rho}{\rho}.$$

При проведении моделирования гидромеханических процессов часто можно удовлетвориться соблюдением не полного подобия, а лишь подобия тех факторов, которые наиболее полно влияют на исследуемый процесс, т.е. осуществить так называемое *приближенное моделирование*.

Так, например, при турбулентном перемешивании жидкости влияние силы тяжести на распределение скорости и перепада давлений

очень мало. Это обстоятельство позволяет при моделировании данного процесса пренебречь критерием Фруда и упростить уравнение (6.2), представив его в виде (6.3) (см. подразд. 6.2).

Если какой-либо параметр не влияет на протекание процесса, то процесс называют *автомодельным* по отношению к этому параметру. С этой позиции указанное вынужденное турбулентное движение жидкости можно считать автомодельным по критерию Фруда.

В случае, когда характер движения среды определяют только параметры физических свойств самой среды (плотность, вязкость, поверхностное натяжение и др.), такой процесс называют *полностью автомодельным.*

6.2. Перемешивание жидких сред [1, 2, 4, 8, 9]

Способы перемешивания. Процесс перемешивания жидкостных одно- и многофазных сред состоит в многократном относительном перемещении макрочастиц объема среды (элементов, ансамблей, пакетов) под действием импульса (количества движения), передаваемого ей побудителем – насосом, мешалкой, струей жидкости и т.д.

Основная цель процесса перемешивания заключается в *интенсификации* получения однородных гомогенных и гетерогенных смесей (растворов, суспензий, эмульсий), тепло- и массообменных (диффузионных) процессов, химических превращений (например, растворения твердых веществ в жидкости). При этом оценивается *эффективность* (качество) перемешивания в зависимости от технологического назначения процесса. Так, при перемешивании для интенсификации химических превращений, тепловых и диффузионных процессов эффективность оценивают отношением коэффициентов скорости процессов, проводимых с перемешиванием и без перемешивания. Эффективность, например, процессов получения суспензий и эмульсий характеризуется достигаемой степенью однородности единицы перемешиваемого объема жидкости и в каждом конкретном случае определяется целесообразной интенсивностью, требующей минимальных расходов материалов, энергии и времени на проведение процесса. Таким образом, эффективность перемешивания является основной характеристикой для оценки работы аппарата при выборе его оптимального режима функционирования.

Наибольшее распространение в производстве ПВВ получили следующие способы перемешивания:

- циркуляционное (многократное прокачивание жидкости через рабочую зону с помощью насосов);
- механическое с помощью вращающихся мешалок различной конструкции;

- в трубопроводах с неподвижными турбулизаторами потоков среды.

Циркуляционное перемешивание. Процесс циркуляционного перемешивания осуществляется с помощью насосов, как правило, центробежных или шестеренчатых, расположенных вне или внутри аппарата с перемешиваемой жидкой средой (растворимые жидкости, суспензии, эмульсии и т.п.). В первом случае циркуляцию называют *внешней*, во втором – *внутренней* [1].

При внешнем циркуляционном перемешивании (рис. 6.1, *а*) жидкость, находящаяся в емкости *1*, забирается насосом *2* и возвращается в ту же емкость. При внутренней циркуляции (рис. 6.1, *б*) колесо, например, центробежного насоса без корпуса с двухсторонним всасыванием (верхним и нижним) закреплено на валу *2*, вращение которому сообщается от электродвигателя (на схеме не показан), размещенного на крышке емкости *1*. Жидкость засасывается в рабочее колесо по оси и выбрасывается по его периферии, вовлекая в движение весь объем жидкости. В обоих вариантах циркуляционного перемешивания многократное прокачивание жидкостной среды через рабочий объем приводит к выравниванию свойств этой среды в различных ее точках.

Необходимая подача насоса Q определяется приемлемым качеством перемешивания. Обычно эмпирически для каждого конкретного случая перемешивания устанавливается кратность циркуляции $k_ц = Q/V$, которая показывает, сколько раз рабочий объем системы V должен смениться в единицу времени, чтобы обеспечить заданное качество перемешивания. При известном V и принятом по опытным рекомендациям $k_ц$ легко найти подачу насоса $Q = k_ц V$ и с учетом напора насоса h (высота слоя жидкости на рис. 6.1) определить потребляемую мощность и выбрать тип насоса. В случае внешней циркуляции к силе

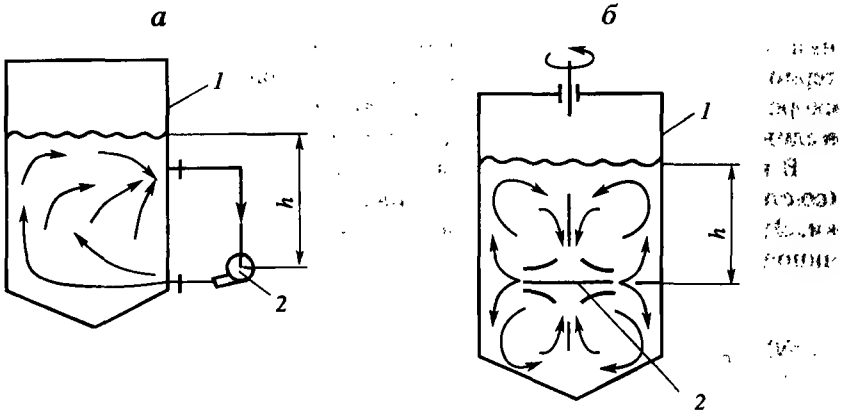


Рис. 6.1. Схемы внешней (*а*) и внутренней (*б*) циркуляций

напора h следует добавить гидравлическое сопротивление трубопроводов. В случае внутренней циркуляции следует иметь в виду, что для центробежного насоса без корпуса, когда области всасывания и нагнетания свободно сообщаются, характерно снижение значения коэффициента подачи $\eta_п$. В частности, для обычного на практике отношения диаметров рабочего колеса и емкости на уровне 0,5–0,7 значение $\eta_п = 0{,}4 \div 0{,}5$; для центробежного насоса, снабженного корпусом, $\eta_п \cong 1$.

Различные схемы циркуляционного перемешивания обычно применяются для мало вязких гомогенных жидкостей и гетерогенных жидких смесей (суспензий и эмульсий) с относительно малым содержанием дисперсной фазы.

Перемешивание лопастными мешалками. Этот процесс обеспечивается путем вращения мешалок либо непосредственно от электродвигателя, либо через редуктор или клиноременную передачу.

Процесс перемешивания механическими мешалками сводится к внешней задаче гидродинамики – обтеканию тел потоком жидкости. При ламинарном режиме движения ньютоновских жидкостей эта задача может быть решена с помощью уравнений Навье–Стокса и неразрывности потока (см. подразд. 4.3). Точное аналитическое решение указанной задачи весьма сложно и возможно лишь для частных случаев; кроме того, процесс перемешивания часто осуществляется при турбулентном режиме. Поэтому для решения этой задачи используют теорию подобия.

Мощность, потребляемую механическими мешалками, определяют следующим образом. Для описания процесса перемешивания применяют модифицированные критерии Эйлера ($Eu_м$), Рейнольдса ($Re_м$) и Фруда ($Fr_м$), которые могут быть получены путем преобразования обычных выражений этих критериев (см. подразд. 6.1). Вместо линейной скорости жидкости w, среднее значение которой при перемешивании установить практически невозможно, в модифицированные критерии подставляют произведение $n_0 d_м$, пропорциональное окружной скорости мешалки, т.е. $w \sim n_0 d_м$ (здесь n_0 – частота вращения мешалки в единицу времени; $d_м$ – диаметр мешалки).

В критерий Эйлера входит разность давления Δp между передней (со стороны набегания потока) и задней плоскостями лопасти мешалки. Этот перепад давления можно заменить пропорциональной величиной

$$\Delta p = \frac{P}{S} \sim \frac{N}{(n_0 d_м) S} \sim \frac{N}{n_0 d_м^3},$$

где P – результирующая сила давления на лопасть мешалки; S – площадь, на которой распределено усилие P; $S \sim d_м^2$.

В результате получим следующие выражения для модифицированных критериев подобия:

$$Re_м = \frac{n_0 d_м^2 \rho}{\mu};\ Fr_м = \frac{n_0^2 d_м}{g};\ Eu_м = \frac{N}{\rho n_0^3 d_м^5} = K_N,$$

где ρ, μ – соответственно плотность и динамическая вязкость перемешиваемой среды; g – ускорение свободного падения.

При перемешивании гетерогенных смесей в выражения модифицированных критериев подобия подставляют значение плотности сплошной (дисперсионной) среды, если плотности перемешиваемых фаз отличаются не более чем на 30%. В остальных случаях необходимо подставлять среднюю плотность смеси $\rho_{см}$, определяемую по правилу аддитивности (см. подразд. 2.5).

Вид уравнения для определения вязкости смеси $\mu_{см}$ зависит от назначения и условий проведения процесса (см. подразд. 2.5).

Модифицированный критерий Эйлера часто называют *критерием мощности* и обозначают через K_N.

Для упрощенных расчетов опытные данные о мощностях, затрачиваемых на перемешивание, представляют в виде графической зависимости критерия мощности K_N от модифицированного критерия Рейнольдса $Re_м$ с геометрическими симплексами Γ_1, Γ_2, ... и критерием Фруда $Fr_м$ в качестве параметров. Для геометрически подобных мешалок и аппаратов в случае соблюдения подобия условий на входе жидкости в аппарат и выходе из него, когда силой тяжести из-за ее малости по сравнению с силами инерции можно пренебречь, критерии мощности и, следовательно, мощность, затрачиваемая на перемешивание, зависит только от критерия Рейнольдса $Re_м$. Критерий

$$K_N = F(Re_м). \qquad (6.3)$$

Графики *1–15* зависимости K_N от $Re_м$ для основных типов нормализованных перемешивающих устройств, построенные на основании многочисленных экспериментальных данных [2], приведены на рис. 6.2.

Геометрические характеристики мешалок и аппаратов, для которых построен график $K_N = \varphi(Re_м)$, приведены в табл. 6.1, а их схематическое изображение на рис. 6.3.

При перемешивании механическими мешалками различают два режима перемешивания: ламинарный и турбулентный. Ламинарный режим ($Re_м < 30$) соответствует неинтенсивному перемешиванию, при котором жидкость плавно обтекает кромки лопасти мешалки, захватывается лопастями и вращается вместе с ними. При ламинарном режиме перемешиваются только те слои жидкости, которые непосредственно примыкают к лопасти мешалки.

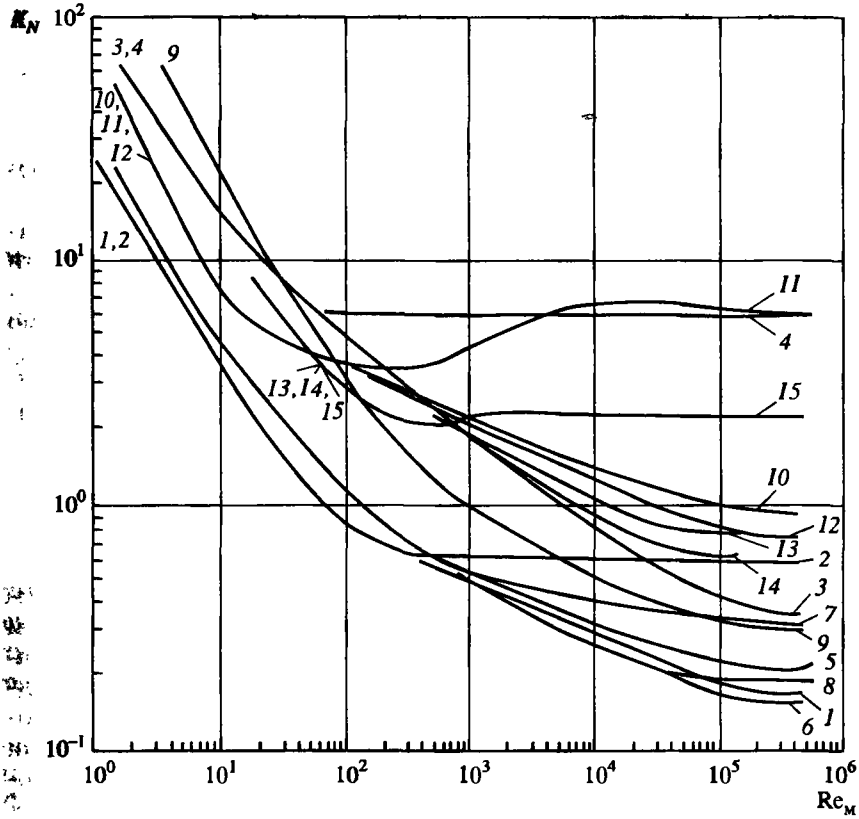


Рис. 6.2. Зависимость $K_N - Re_м$

С увеличением скорости вращения мешалки возрастает сопротивление среды движению мешалки, вызванное турбулизацией пограничного слоя и образованием турбулентного кормового следа в пространстве за движущимися лопастями. При ($Re_м > 10^2$) возникает турбулентный режим перемешивания, характеризующийся менее резкой зависимостью критерия мощности K_N от $Re_м$.

В области развитой турбулентности ($Re_м > 10^5$) критерий K_N практически не зависит от $Re_м$. В этой области, которая называется *автомодельной*, расход энергии определяется только инерционными силами. Дальнейшее увеличение скорости вращения мешалки, хотя и приводит к более интенсивному перемешиванию среды, часто оказывается неэффективным, вследствие того, что возрастание затрат мощности в этом случае не компенсируется достигаемым эффектом.

Таблица 6.1

Характеристики мешалок (см. рис. 6.2 и 6.3)

Номер кривой на рис. 6.2	Типы мешалок	Основные размеры мешалок			
		$d_м/D$	b/D	n	α, град
1	Лопастная	0,66	0,10	2	90
2	» с перегородками	0,66	0,10	2	90
3	Листовая	0,50	0,75	2	90
4	» с отражательными перегородками	0,50	0,75	2	90
5	Пропеллерная	0,25	–	3	40
6	»	0,33	–	3	40
7	» с отражательными перегородками	0,25–0,33	–	3	40
8	Пропеллерная с диффузором	0,20–0,33	–	3	40
9	Якорные и рамные	0,87	0,07	–	90
10	Турбинная открытая	0,25	0,20	6	90
11	То же	0,33	0,20	6	90
12	» с отражательными перегородками	0,25–0,33	0,20	6	90
13	Турбинная закрытая	0,25	0,15	6	90
14	То же	0,33	0,15	6	90
15	» с отражательными перегородками	0,25–0,33	0,15	6	90

Примечания: 1. В таблице использованы обозначения: $d_м$ – диаметр мешалки; D – диаметр аппарата; b – ширина лопасти мешалки; n – число лопастей; α – угол наклона плоскости лопасти к горизонтальной плоскости.

2. Ширина отражающих перегородок 0,1 D, их число – 4, высота уровня жидкости в аппарате $h = D$.

Следует отметить, что приведенные критические значения критерия $Re_м$, определяющие границы режимов, являются весьма ориентировочными; их численные значения существенно зависят от конструкции и геометрических размеров мешалки и аппарата.

Если высота уровня жидкости в аппарате h не равна его диаметру D, то определенное с помощью графика на рис. 6.2 значение критерия мощности $K_N = \varphi(Re_м)$ умножают на поправочный коэффициент $k = (h/D)^{0,5}$. При сильной шероховатости стенок аппаратов, а также при наличии в них внутренних устройств (гильз термометров, змеевиков и т. п.) потребляемая на перемешивание энергия существенно возрастает лишь при отсутствии отражательных перегородок. Так, наличие в аппарате змеевика увеличивает потребляемую мощность в 2–3 раза, а наличие гильз для замера температуры, уровня жидкости – в 1,1–1,2

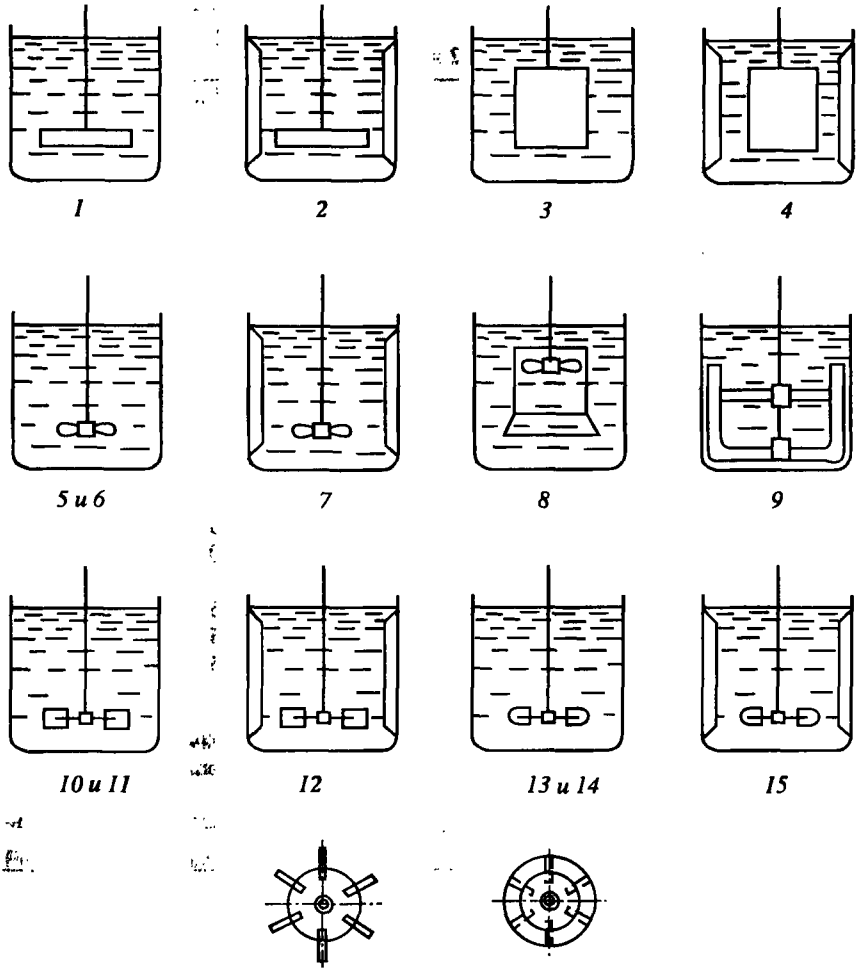


Рис. 6.3. Схемы лопастных мешалок

раза. Мощность, затрачиваемая на перемешивание в аппаратах с сильно шероховатыми стенками, возрастает на 10–20%.

Электродвигатель для привода мешалки подбирают по мощности на валу мешалки, равной полезной мощности, которая сообщается жидкости, деленной на КПД передачи. При этом следует иметь в виду возможность кратковременного увеличения крутящего момента на валу электродвигателя в момент пуска. Пусковая мощность обычно превышает рабочую мощность не более чем в 2 раза и потребляется в течение очень непродолжительного времени.

Угловую частоту вращения мешалки выбирают с учетом назначения процесса, типа и конструкции перемешивающего устройства.

При приготовлении суспензий равномерное распределение твердых частиц в жидкости достигается при такой угловой скорости вращения мешалки n_0, когда осевая составляющая скорости потока жидкости становится равной или несколько больше скорости осаждения частиц. В этом случае восходящий поток жидкости поддерживает твердые частицы во взвешенном состоянии, препятствуя их осаждению. Частота вращения n_0 в единицу времени может быть определена по уравнению [2]

$$\mathrm{Re}_{\text{м}} = \frac{n_0 d_{\text{м}}^2 \rho}{\mu} = C_1 \mathrm{Ar}\left(\frac{d_{\text{ч}}}{d_{\text{м}}}\right)^{0,5}\left(\frac{D}{d_{\text{м}}}\right)^{k}, \qquad (6.4)$$

где Ar – критерий Архимеда; $\mathrm{Ar} = \frac{g d_{\text{ч}}^3}{\upsilon_{\text{с}}^2}\frac{\Delta\rho}{\rho_{\text{с}}}$; $\Delta\rho$ – разность плотностей фаз; $\rho_{\text{с}}$ – плотность сплошной (дисперсионной) среды; $\upsilon_{\text{с}}$ – кинематическая вязкость сплошной среды; $d_{\text{ч}}$ – средний диаметр частиц; $D/d_{\text{м}}$ – отношение диаметра аппарата к диаметру мешалки.

Значения коэффициентов C_1 и k, зависящие от типа мешалки, следующие:

	$D/d_{\text{м}}$	C_1	k
Турбинная закрытого типа	1,5–1,4	4,7	1,0
Пропеллерная	1,5–5,0	6,6	1,0
Лопастная	1,33–1,5	14,8	0

Уравнение (6.4) применимо при следующих значениях переменных:

$$\mathrm{Re}_{\text{м}} = 5\cdot10^2 - 1{,}3\cdot10^5;\ \mathrm{Ar} = 2{,}4\cdot10^4 - 4{,}1\cdot10^{11};\ d_{\text{ч}}/d_{\text{м}} = 2{,}33\cdot10^{-4} - 1{,}2\cdot10^{-2}.$$

Для получения эмульсий наиболее часто используют перемешивающие устройства с мешалками лопастного, пропеллерного, турбинного закрытого типов и специального назначения. Скорость вращения мешалки для приготовления эмульсий выбирают с учетом типа и конструкции перемешивающего устройства.

При эмульгировании взаимнонерастворимых жидкостей частоту вращения n_0 в единицу времени мешалки рекомендуется определять из уравнения [2]:

$$Re_м = \frac{n_0 d_м^2 \rho}{\mu} = C_2 Ar^{0,315} \left(\frac{Re_м}{We_м}\right)^{0,185} \left(\frac{D}{d_м}\right)^n, \qquad (6.5)$$

где $We_м = \frac{n_0^2 d_м^3 \rho}{\sigma_э}$ – модифицированный критерий Вебера, представляющий критерий We (см. подразд. 6.2), в котором $l = d_м$ и вместо линейной скорости w подставлено произведение $n_0 d_м$, пропорциональное окружной скорости мешалки; $\sigma_э$ – межфазное поверхностное натяжение в эмульсии.

Уравнение (6.5) применимо при следующих значениях переменных:

$$Re_м = 5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^5; \; Ar = 8{,}9 \cdot 10^3 - 3{,}4 \cdot 10^{10}; \; Re_м/We_м = 6{,}15 - 1{,}18 \cdot 10^7.$$

Коэффициенты C_2 и n в зависимости от типа мешалки имеют следующие значения:

	$D/d_м$	C_2	n
Турбинная закрытого типа	2–4	2,3	0,67
Пропеллерная	2–4	2,95	0,67
Лопастная	1,33–4	1,47	1,3

Время перемешивания определяет продолжительность процесса перемешивания для достижения заданного качества смеси – определенной гомогенности в перемешиваемой среде. Степень гомогенности зависит от размера отбираемых для анализа проб или размеров датчика, определяющего степень гомогенности. Если, например, объем пробы взять равным объему аппарата, то время гомогенизации $\tau_п = 0$, так как средняя концентрация ключевого компонента в пробе равна средней концентрации его в аппарате. Если размеры проб теоретически приближаются к размерам молекул, то $\tau_п \to \infty$, так как однородность в молекулярном масштабе достигается в результате молекулярной диффузии через бесконечно долгое время. Следовательно, время перемешивания – условный показатель, зависящий от масштаба наблюдения.

Тем не менее время перемешивания может использоваться для оценки эффективности работы мешалок. При одной и той же потребляемой мощности для конкретного процесса перемешивания мешалка работает более эффективно, если время перемешивания меньше.

Из анализа размерностей для геометрически подобных аппаратов следует, что время перемешивания

$$n_0 \tau_п = C_3 Re_м^m,$$

где C_3 – постоянный коэффициент, зависящий от типа перемешивающих устройств; m – показатель степени, зависящий от режима течения жидкости в аппарате.

Для турбулентного режима перемешивания ($m = 0$) и $n_0\tau_п = C_3 =$ const.

Значения C_3 для различных перемешивающих устройств следующие [2]:

	$D/d_м$	C_3
Турбинная закрытого типа	3	46,0
То же	4	81,5
» открытого типа	3	56,0
То же	4	99,5
Листовая	2	20,5
»	1,5	20,7
Лопастная	3	96,5
Пропеллерная с диффузором	3	66,2
То же	4	118,0
Пропеллерная	3	96,5
	4	170,0
Якорная	1,15	30,0

Все приведенные зависимости для расчета мощности, затрачиваемой на перемешивание, выбора скорости вращения мешалки и времени перемешивания относятся к ньютоновским жидкостям. Вязкость неньютоновских жидкостей зависит от относительной скорости сдвига $\dot{\gamma}$ (в дальнейшем – скорости сдвига), а следовательно, от скорости вращения и типа мешалки. В результате возникает проблема определения скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для данной скорости вращения мешалки в аппарате заданного типа.

Кольдербанком и Му-Янгом [3] предложена следующая эмпирическая формула для расчета $\dot{\gamma}$ при перемешивании различных неньютоновских жидкостей:

$$\dot{\gamma} = C_4 n_0 \left(\frac{4m}{3m+1}\right)^{\frac{m}{1-m}}, \qquad (6.6)$$

где C_4 – постоянный коэффициент, зависящий от типа неньютоновской жидкости, типа мешалки и геометрических размеров аппарата и мешалки; его значения приведены в табл. 6.2.

Зная скорость сдвига $\dot{\gamma}$, по реологическим кривым жидких сред находят кажущуюся вязкость: $\mu = \tau/\dot{\gamma}$ (где τ – напряжение сдвига), которую подставляют вместо динамической вязкости в число Рейнольдса

Таблица 6.2

Значения коэффициента C_4 в уравнении (6.6)

Тип мешалки	Псевдопластичные жидкости ($m < 1$) при $D/d_м$				
	⩾1,5	1,18	1,11	1,07	1,05
Якорная	19	39	51,5	71,5	84
Турбинная ($n = 6$)	11,6	–	–	–	–
Лопастная ($n = 2$)	10	–	–	–	–
Пропеллерная ($n = 3$)	10	–	–	–	–
Вращающийся цилиндр	$4\pi = 12{,}56$ (теоретическое значение)				

Окончание табл. 6.2

Тип мешалки	Дилатантные жидкости ($m > 1$) при $D/d_м$			
	1,5	2,0	2,13	3,0
Турбинная ($n = 6$)	50	34,5	–	22,5
Лопастная ($n = 2$)	–	27	–	22,5
Пропеллерная ($n = 4$)	–	–	23,5	–

$Re_м$. Затем для нахождения мощности, потребляемой на процесс перемешивания, можно воспользоваться кривыми зависимости K_N от числа $Re_м$ (см. рис. 6.2).

Для приготовления высоковязких пастообразных масс, пластикации композиционных полимерных материалов широко используются двухроторные смесители периодического действия и червячно-лопастные смесители непрерывного действия.

Двухроторный лопастной смеситель с реверсивным шнеком [4] (рис. 6.4) состоит из следующих основных элементов: камеры смешения *1* с крышкой, двух роторов *3* с Z-образными лопастями, реверсивного шнека *2*. Камера смешения представляет собой корыто с двумя торцевыми стенками *5*, в которых крепятся опорные подшипниковые узлы для валов лопастей и шнека. Дно камеры образовано двумя большими полуцилиндрами для размещения лопастей и третьем полуцилиндром для шнека. Корпус камеры смешения имеет полости для обогрева водой или паром. Типовые формы лопастных валов показаны на рис. 6.5.

Смеситель работает следующим образом. В камеру смешения загружают необходимое количество жидких и сыпучих компонентов и включают в движение лопасти и шнек. Лопасти смесителя вращаются навстречу друг другу с различной частотой и перемешивают загруженные компоненты. Навивка лопастей имеет такое направление, что масса обычно движется к центру корыта. Шнек транспортирует массу к задней торцевой стенке камеры и сбрасывает ее на быстроходную ло-

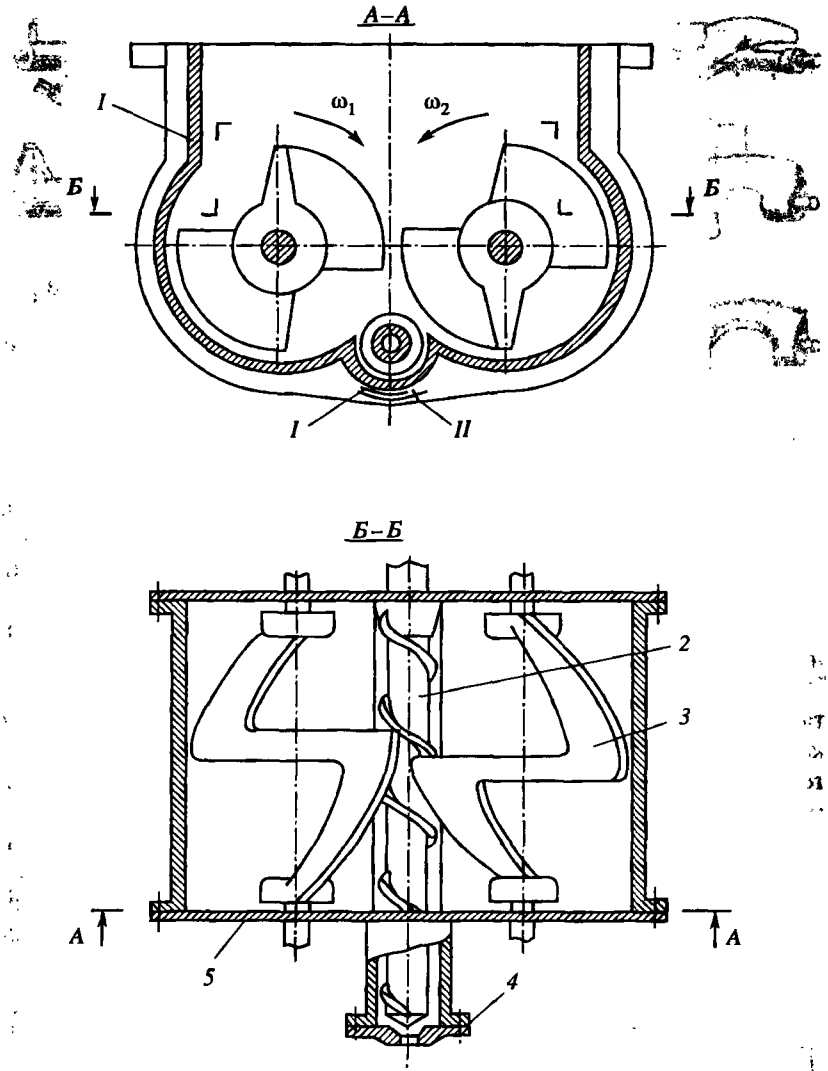


Рис. 6.4. Схема Z-образного смесителя
I – камера смешения; *2* – шнек; *3* – ротор; *4* – фильера; *5* – стенка; *I* – смешение; *II* – выгрузка

пасть; это приводит к значительной интенсификации процесса перемешивания. В конце процесса перемешивания меняется направление вращения шнека. Готовая смесь, подаваемая лопастями, выгружается шнеком через фильеру *4* (см. рис. 6.4).

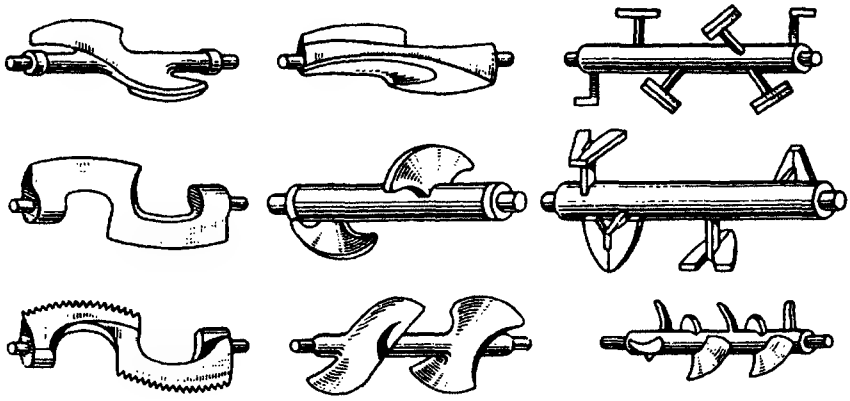


Рис. 6.5. Типовые Z-образные лопасти

Шнековые или *винтовые смесители* бывают одно- и двухвальные. Смесители этого типа позволяют совмещать ряд стадий технологического процесса переработки полимерных материалов – перемешивание, пластикацию, гомогенизацию, выдавливание полимерной композиции через формующую фильеру с одновременной резкой на гранулы или куски.

В одновальных смесителях (рис. 6.6) основным рабочими элементами является шнек (червяк) *3*, вращающийся в цилиндрическом корпусе *2*. В загрузочный бункер *1* поступают компоненты смеси, которые увлекаются в движение витками червяка. По мере продвижения материала к выгрузной фильере *4* происходят процессы перемешивания входящих в его состав компонентов и формования однородной смеси. Математическое описание многих процессов, происходящих в одношнековых машинах, как и расчет основных элементов конструкции, подробно изучены и изложены, например, в [4–7].

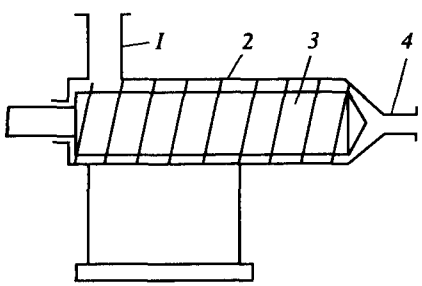


Рис. 6.6. Схема одношнековой машины

В конструкциях двухвальных смесителей параллельно расположенные шнеки *1* могут вращаться навстречу один другому или в одном направлении, при этом их витки находятся в зацеплении. Геометрический профиль витков выбран так, что витки взаимно очищают один другой по всей поверхности и перекрывают винтовые каналы в местах зацепления не более

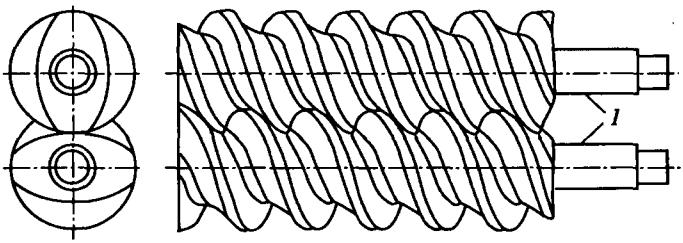


Рис. 6.7. Схема двухчервячного зацепления

чем на 50% площади, при этом образуется 8-образный канал (рис. 6.7). Основной рабочей частью таких машин является набор зональных смесителей (рис. 6.8). Зональный смеситель состоит из двух параллельно вращающихся червяков, имеющих нагнетательные *2* и тормозящие *3* витки. Для продвижения перемешиваемой массы от загрузочного отверстия *1* до выгрузного отверстия число нагнетательных витков принимается большим, чем число тормозящих витков.

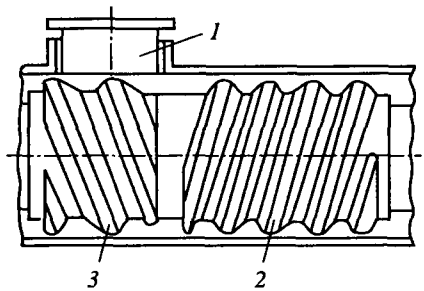


Рис. 6.8. Схема двухвального смесителя

Производительность смесителя регулируется дозирующими устройствами соотношения компонентов, входящих в состав смеси. На производительность смесителя и тепловой режим процесса перемешивания влияют геометрические размеры шнеков и скорость их вращения, тепловой режим достигается и регулируется с помощью теплоносителя, подаваемого в зональные рубашки корпуса и червячные валки. Более подробные сведения о работе двухвинтовых смесителей можно найти в [8, 9].

6.3. Диспергирование жидких сред [1, 2, 4, 10]

Влияние основных технологических факторов на процесс эмульгирования. Эмульсии могут получаться почти в любых концентрациях дисперсной фазы: от сколь угодно малых, в которых капельки вполне свободно сендиментируют или диффундируют в зависимости от их размеров, и до весьма высоких объемных концентраций, когда дисперсион-

ная среда остается в виде тончайших пленок между капельками. Высоко концентрированные эмульсии могут быть получены и сохранены на определенное время только в присутствии поверхностно-активных веществ (эмульгаторов), назначение которых состоит в уменьшении межфазного поверхностного натяжения. Молекулы эмульгатора, адсорбируясь на поверхности капелек эмульсии, образуют мономолекулярную пленку, препятствующую их коалесценсии.

На вид образуемой эмульсии большое значение оказывает способ введения эмульгатора в смесь жидкостей. Обычно для образования эмульсии В/М («вода в масле») эмульгатор предварительно растворяют в масляной фазе, куда затем добавляют воду.

Обратный процессу *диспергирования* (дробления) является процесс *коалесценции* (слияния) образовавшихся капель. Образование эмульсий за счет внутрифазового диспергирования – это «быстрый» процесс, протекающий в течение 1 с и менее. Коалесценция – процесс сравнительно медленный: он длится минуты, часы и даже месяцы. Естественно, что для осуществления быстрых процессов требуются методы и аппаратура, работающие в динамических условиях.

Установлено (Гопал, 1959 г.)[10], что продолжение перемешивания сверх оптимального времени мало улучшает качество эмульсии. При нормальных условиях эмульгирования средние размеры капель уменьшаются очень быстро в течение первых нескольких секунд, и постепенно достигают предельного значения за 1–5 мин. Стабильность и вязкость эмульсий изменяются аналогичным образом. Таким образом, если время перемешивания больше оптимального, то затраты мощности оказываются невыгодными. Это связано с тем, что при образовании эмульсии происходят два процесса – диспергирование и коалесценция. В течение первых нескольких секунд перемешивания преобладает первый процесс – диспергирование, а коалесценция распространяется лишь на малое число капель. Чем больше в процессе перемешивания образуется отдельных капель, тем более частыми будут и соударения между ними. После нескольких минут перемешивания коалесценция будет происходить столь же часто, как и диспергирование, т. е. оба процесса станут равновесными. Именно условиями равновесия определяются величина концентрации эмульгатора, размер капель и другие характеристики эмульсии. Следует также учитывать то обстоятельство, что с уменьшением размера капель их жесткость возрастает, и диспергируются они хуже. При определенной интенсивности перемешивания капли дробятся только до какого-то предела.

Для осуществления процесса диспергирования одной жидкости в другой с целью образования эмульсии используют следущие способы: перемешивание, гомогонизацию, коллоидное дробление, гидроакустическое и электрогидравлическое воздействия.

Теория механического диспергирования. Рассмотренный в предыдущем разделе анализ основных факторов процесса эмульгирования, дает представление об обстоятельствах, при которых эмульсия может быть прямой или обратной, стабильной или нестабильной. Остается вопрос, почему и как большой объем жидкости распадается на отдельные капли? Ответ можно получить, если процесс эмульгирования рассмотреть с позиции *гидродинамической нестабильности.*

При свободном течении смесь двух жидкостей стремится остаться в виде двух отдельных термодинамически устойчивых фаз. Только при сообщении системе энергии течение становится нестабильным, образуются взвеси одной жидкости в другой. Основной принцип, положенный в основу изучения устойчивости, очень прост. На первоначально заданное течение накладывается небольшое возмущение и определяется, будет ли со временем амплитуда возмущения уменьшаться или увеличиваться. Если возмущение затихает, система возвращается к первоначальному состоянию – устойчивому течению. Если же, напротив, амплитуда возмущения возрастает, то это соответствует неустойчивому течению, когда первоначальный поток разбивается на несколько отдельных потоков.

Некоторые виды гидродинамической нестабильности изучены и приведены в [11,12]. Многие из них встречаются в различных процессах химической технологии, другие – только при эмульгировании. Рассмотренный ранее (см. подразд. 6.1) переход от ламинарного течения к турбулентному является одним из важных видов нестабильности, приводящий к диспергированию жидкостей. Первоначальный разрыв поверхности двух несмешивающихся жидкостей происходит, главным образом, при больших скоростях вращения мешалки, когда наблюдается турбулентный режим перемешивания. В дальнейшем происходит проникновение слоев одной жидкости в другую, из тонких разрозненных слоев жидкости образуются капли. На последней стадии эмульгирования происходит распад больших капель жидкости на капельки меньшего размера. Это явление связано с деформированием капель под действием динамических сил (перепадов давлений Δp), возникающих вследствие градиента скоростей в турбулентном вихре на расстоянии, равном диаметру капли.

Следуя этому механизму диспергирования, в потоке со сплошной плотностью ρ_c среды возникают турбулентные пульсации скорости. Они обусловливают появление разности динамических напоров $\Delta p = (w_1^2 - w_2^2)\rho_c/2 = \overline{w}^2\rho_c/2$ (здесь w_1, w_2 – скорости сплошной среды на противоположных сторонах капли). Отношение силы результирующего динамического напора, стремящегося деформировать и разорвать каплю диаметром d, к силе поверхностного натяжения, стремящейся сохранить каплю, оценивается *критерием Вебера*

$$We \equiv \frac{\overline{w}^2 \rho_c d}{\sigma_м},$$

где $\sigma_м$ – *коэффициент поверхностного натяжения* на границе капли и сплошной среды.

Повышение критерия We приводит к увеличению деформации капли, и при достижении его критического значения (на уровне $We \approx 12$) капля разрывается. Следовательно, при прочих равных условиях разрыв капли определяется параметром $\overline{w}^2$, в свою очередь зависящим от масштаба турбулентных пульсаций.

Согласно *теории локальной изотропной турбулентности,* если масштаб пульсации $l_п$ больше диаметра капли d, то эти относительно крупные вихри перемещают каплю без ее разрушения. Дробление капли наблюдается, когда масштаб относительно мелких вихрей $l_п < d$.

Параметр $\overline{w}^2$ (флуктуация среднеквадратичной скорости за пределами d) по А.Н. Колмогорову для диапазона $l_п \le d$ определяется соотношением [1]

$$\overline{w}^2 = C_1 (ed)^{1/3}, \qquad (6.7)$$

где e – диссипация (рассеяние) энергии в единице массы сплошной среды; C_1 – коэффициент пропорциональности.

Для практического использования соотношения (6.7) диссипацию энергии выражают через мощность N, подводимую конкретным диспергатором к массе среды, заключенной в объеме V:

$$e = \frac{N}{\rho_c V}.$$

Для стабилизированного режима эмульгирования (установившиеся скорости диспергирования и коалесценции капель) критерий Вебера имеет некоторое постоянное значение:

$$We \equiv \frac{\overline{w}^2 \rho_c d}{\sigma_м} = \left(C_1 \frac{Nd}{\rho_c V} \right)^{2/3} \frac{\rho_c d}{\sigma_м} = \text{const}$$

и

$$d = C_2 \frac{\sigma_м^{0,6}}{\rho_c^{0,2} (N/V)^{0,4}}, \qquad (6.8)$$

где C_2 – некоторый постоянный параметр.

Из выражения (6.8) следует, что размер образующихся капель уменьшается с падением межфазного поверхностного натяжения $\sigma_м$ и ростом средней плотности эмульсии ρ_c, а также с увеличением подводимой на диспергирование удельной мощности N/V.

Теория изотропной локальной турбулентности качественно правильно отражает влияние показателей (N/V), $\rho_м$, ρ_c на процесс диспергирования жидкостей, однако не учитывает известный из экспериментов факт образования капель разного размера (*распределение капель по размеру*). Это связано главным образом со следующими причинами:

- капли находятся под действием вихря турбулентного потока разное время, в ряде случаев недостаточное для образования равновесного диаметра d, отвечающего формуле (6.8);
- одновременно с диспергированием наблюдается и обратное явление – коалесценция капель, в результате в смеси появляются капли большего размера, чем это следует из теории;
- в соответствии с выражением (6.7) параметр $\overline{w}^2$ зависит от масштаба мелких вихрей $l_п$, а параметры $l_п$ в турбулентном потоке сами распределены по размеру, что может привести к образованию и более мелких капель по сравнению с теоретическими расчетами.

Таким образом, возникает проблема установления среднего размера капель и закона их распределения по размерам.

Средний размер капель – диаметр d, связан с удельной межфазной поверхностью a и объемной долей дисперсной фазы ϕ [(1 м^3 дисперсной фазы)/(1 м^3 объема системы)]. Эту связь можно выявить из следующих соображений. Заменим неодинаковые по размерам капли, находящиеся в 1 м^3 эмульсии, на n шарообразных капель с теми же суммарной поверхностью и объемом. Тогда *средний объемно-поверхностный диаметр* таких капель d_{32} определяется соотношениями

$$a = \frac{n(\pi d^2)}{1\text{м}^3}, \quad \phi = \frac{n(\pi d^3/6)}{1\text{м}^3}$$

и

$$d_{32} \equiv \frac{d^3}{d^2} = \frac{6\phi}{a} = \frac{6(1-\varepsilon)}{a},$$

где ε – объемная доля сплошной (дисперсионной) среды.

Применение формулы (6.8) для определения диаметра d_{32} правомерно при введении поправки на величину ϕ. На основании экспериментальных исследований для эмульсий рекомендуется расчетная формула следующего вида:

$$d_{32} = C\frac{\sigma_м^{0,6}}{\rho_c^{0,2}(N/V)^{0,4}}\phi^m, \qquad (8.8)$$

где C, m – эмпирические константы.

Распределение капель по размерам подчиняется нормально-логарифмическому закону, а вероятность логарифма доли капель текущего размера характеризуется нормальным распределением. Этот закон, присущий вообще большому числу случайных событий, установлен теоретически и подтвержден обширными экспериментами для широкого круга дисперсий, в том числе при эмульгировании жидкостей.

Перемешивающие устройства для эмульгирования. Диспергирование жидкостей для образования эмульсий может осуществляться при перемешивании взаимно нерастворимых жидкостей с использованием быстроходных типовых мешалок (турбинных закрытого типа, пропеллерных с дифузором, лопастных и др.), аппаратов со специальными мешалками [2], а также в статических смесителях [4].

Турбинные мешалки имеют форму колес турбин с плоскими, наклоненными или криволинейными лопатками, укрепленными, как правило, на вертикальном валу. В аппаратах с турбинными мешалками создаются преимущественно радиальные потоки жидкости, а при их работе с большой скоростью вращения наряду с радиальным потоком возникает и тангенциальное (круговое) течение.

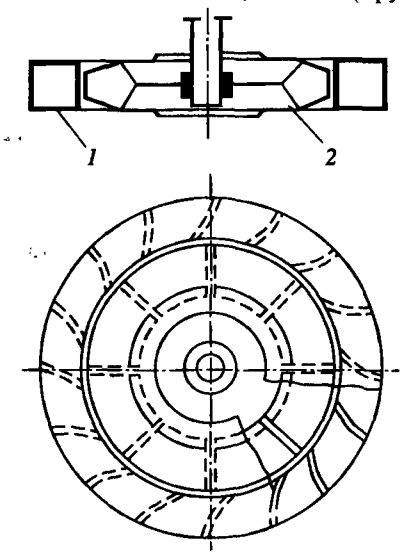


Рис. 6.9. Схема турбинной мешалки закрытого типа

Закрытые турбинные мешалки в отличие от открытых создают более четко выраженный радиальный поток. Они имеют два диска *2* (рис. 6.9) с отверстиями в центре для прохода жидкости; диски сверху и снизу привариваются к плоским лопастям. Жидкость поступает в мешалку параллельно оси вала, выбрасывается через направляющее устройство *1* в радиальном направлении и достигает наиболее удаленных точек аппарата. Турбинные мешалки обеспечивают интенсивное перемешивание во всем объеме аппарата.

При больших значениях отношения высоты к диаметру аппарата применяют много-

рядные турбинные мешалки. Турбинные мешалки обычно имеют диаметр $d_м = (0{,}15 \div 0{,}65)\ D$ при отношении высоты уровня жидкости к диаметру аппарата не более двух; частота вращения колеблется от 2 до 5 $с^{-1}$, а окружная скорость составляет 3–8 м/с.

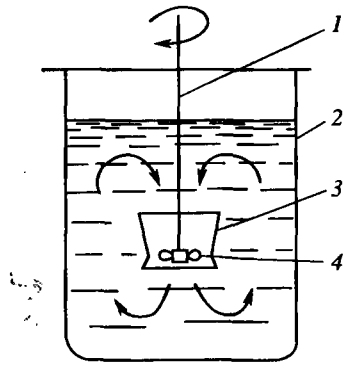


Рис. 6.10. Пропеллерная мешалка с диффузором

Пропеллерные мешалки с диффузором создают преимущественно осевые потоки перемешиваемой среды и, как следствие этого, – большой насосный эффект, что позволяет существенно сократить продолжительность перемешивания. Для улучшения перемешивания и организации направленного течения жидкости (при большом отношении высоты к диаметру аппарата) в сосудах устанавливают направляющий аппарат или диффузор (рис. 6.10). Диффузор представляет собой короткий цилиндрический или конический стакан *3*, который закреплен внутри корпуса аппарата *2*. Внутри диффузора помещают мешалку *4*, закрепленную на валу *1*.

Для пропеллерных мешалок принимают следующие соотношения основных размеров: диаметр мешалки $d_м = (0{,}2 \div 0{,}5)\ D$, шаг винта $s = (1{,}0 \div 3{,}0)\ D$, расстояние от мешалки до дна сосуда составляет $(0{,}5 \div 1{,}0)d_м$, высота уровня жидкости в сосуде $h = (0{,}8 \div 1{,}2)\ D$. Угловая скорость вращения мешалки достигает 40 $с^{-1}$, окружная – 15 м/с.

Специальные мешалки имеют более ограниченное применение в процессах эмульгирования, чем мешалки рассмотренных типов.

Дисковые мешалки представляют собой один или несколько гладких дисков *1*, вращающихся с большой скоростью на вертикальном валу *2* (рис. 6.11). Течение жидкости происходит в тангенциальном направлении за счет трения жидкости о диск; при этом сужающиеся диски создают также осевой поток. Иногда края дисков делают зубчатыми. Диаметр диска составляет 0,1 ÷ 0,15 диаметра аппарата, окружная скорость равна 5–35 м/с, что при небольших размерах диска соответствует очень высокой частоте вращения. Потребление энергии колеблется от 0,5 кВт для маловязких сред до 20 кВт для вязких смесей.

Вибрационные мешалки имеют вал *1* с закрепленными на нем одним или несколькими перфорированными дисками *2* (рис. 6.12). Диски совершают возвратно-поступательное движение, при котором достигается интенсивное перемешивание содержимого аппарата в разных направлениях (показано стрелками). Энергия, потребляемая мешалками этого типа, невелика. Они используются для перемешивания жидких смесей, в том числе и эмульсий преимущественно в аппаратах, работающих под давлением.

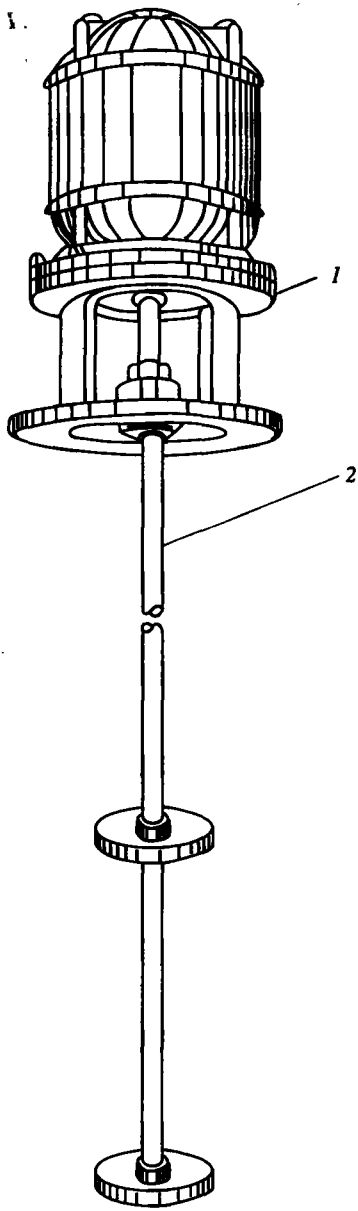


Рис. 6.11. Схема дисковой мешалки

Статические смесители (рис. 6.13) представляют собой устройства с неподвижно перемешивающими элементами *1*, встроенными в цилиндрическую трубу *2*. Перемешивание и диспергирование жидкостей и суспензий осуществляется за счет использования энергии потока при его многократном делении на элементарные струйки и их переориентации.

Преимущества статических смесителей перед емкостной аппаратурой с перемешивающими устройствами и динамическими (вибрационными) смесителями при сопоставимых результатах по качеству получаемых смесей связано с низкой энерго- и металлоемкостью, простотой изготовления и обслуживания, компактностью и дешевизной. Статические смесители находят широкое применение при эмульгировании жидкостей.

Фирма "Sulzer" (Швейцария) выпускает следующие типовые конструкции перемешивающих устройств для статических смесителей (рис. 6.14) [13]:

- смеситель типа SMV используется главным образом для режима турбулентного течения, например, для перемешивания низковязких жидкостей и диспергирования несмешивающихся жидкостей;
- смеситель типа SMX используется в основном для режима ламинарного течения, например, для перемешивания высоковязких сред или сред с сильно различающейся вязкостью;
- смеситель-теплообменник типа SMXL используется преимущественно для режима ламинарного потока в качестве теплообменника для чувствительных к тепловым нагрузкам сред.

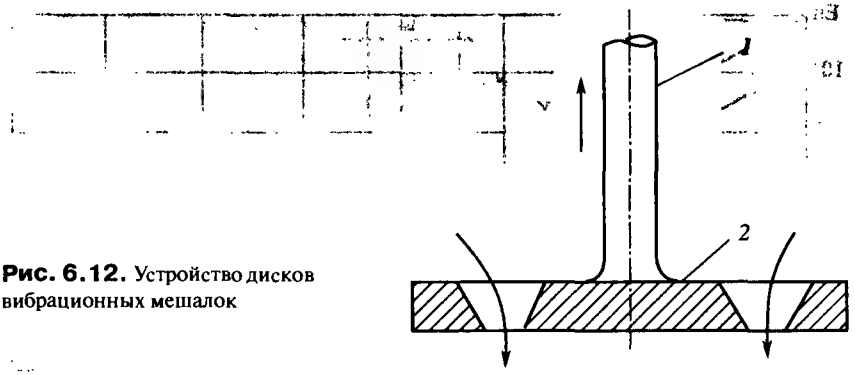


Рис. 6.12. Устройство дисков вибрационных мешалок

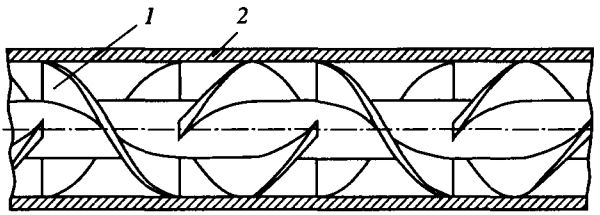
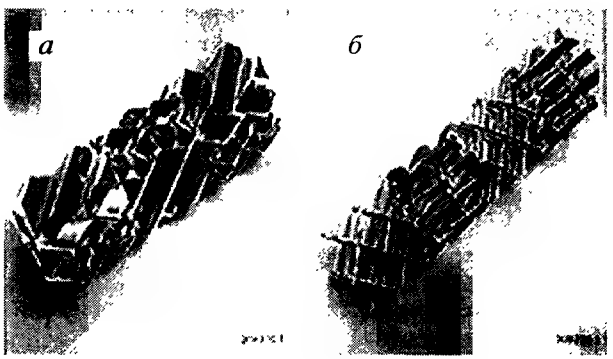


Рис. 6.13. Схема статического смесителя



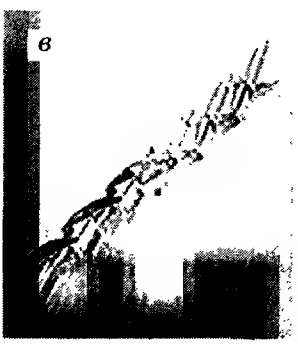


Рис. 6.14. Типовые статические смесители фирмы «Sulzer» (Швейцария):
а – SMV; *б* – SMX; *в* – SMXL

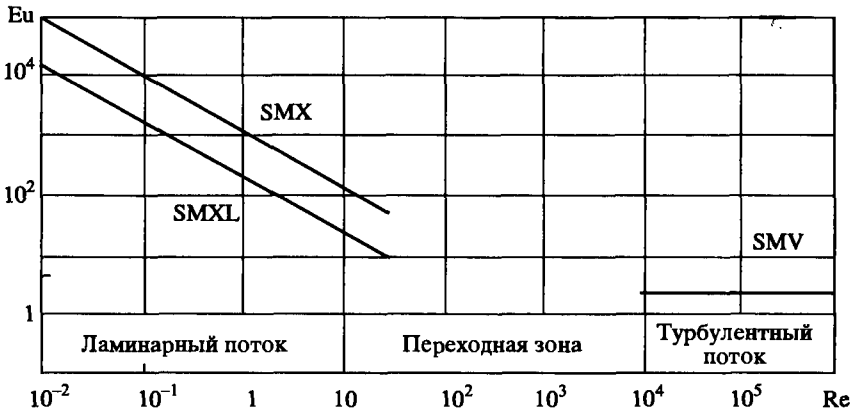


Рис. 6.15. Зависимость критерия Eu от критерия Re для статических смесителей

Для расчета гидравлического сопротивления (перепада давления Δp) статических смесителей при течении ньютоновских жидкостей фирмой "Sulzer" предложено следующее выражение

$$\Delta p = \mathrm{Eu}\rho v^2 \frac{L}{D}, \tag{6.9}$$

где Eu – критерий Эйлера; $\mathrm{Eu} = \Delta p/\rho v^2$; ρ – плотность смеси; v – средняя скорость потока через поперечное сечение смесителя $v = 4Q/(\pi D^2)$; Q – объемный расход материала смеси; L, D – соответственно длина и диаметр смесителя.

График зависимости Eu от $\mathrm{Re} = v\mathrm{D}\rho/\mu$ для типовых статических смесителей фирмы "Sulzer", построенный на основании опытных данных, приведен на рис. 6.15.

При турбулентном режиме течения число Эйлера становится величиной постоянной: Eu ≈ 2 (для смесителя типа SMV).

При ламинарном режиме течения число Эйлера изменяется прямо пропорционально в зависимости от числа Рейнольдса и перепад давления определяется следующим выражением:

$$\Delta p = \mathrm{EuRe}\frac{\mu v}{D}\frac{L}{D}. \tag{6.10}$$

Здесь Eu Re ≈ 1200 для смесителя типа SMX и Eu Re ≈ 250 для смесителя типа SMXL.

Теория процесса диспергирования при истечении из отверстий. Режим диспергирования при истечении жидкости из отверстий и сопел может быть капельным и струйным. При *капельном режиме* (низкие ско-

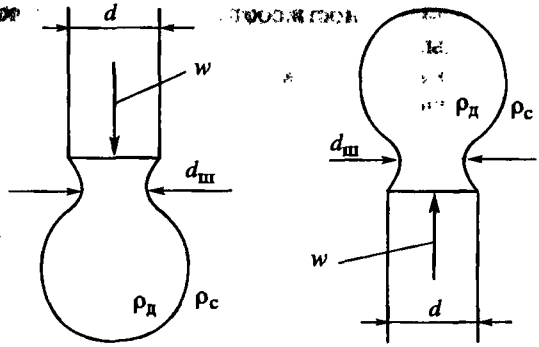


Рис. 6.16. Схема образования капель

рости истечения) капли образуются сразу на выходе из отверстий диспергирующего устройства (рис. 6.16). При *струйном режиме* (высокие скорости истечения) поверхность струи жидкости находится под воздействием волнообразных периодически повторяющихся колебаний, возникающих под действием шероховатости кромок отверстий и других возмущающих факторов. На поверхности струи образуются округлые впадины и выступы, радиус которых непрерывно растет до тех пор, пока струя в месте ее наибольшего сужения не разбивается на отдельные капли на некотором удалении от выходного среза отверстия сопла; это схематично показано на рис. 6.17.

Пусть выходной диаметр сопла (отверстия) равен d (см. рис. 6.16), а шейки капли – ψd (здесь ψ – коэффициент сужения, причем $\psi < 1$). Тогда при вертикальном направлении оси отверстия диаметр капли $d_к$, образующейся при капельном режиме диспергирования, когда силами инерции и местным сопротивлением на выходе из отверстия можно пренебречь, определяется из равенства сил веса капли $G = \pi d_к^3(\rho_д - \rho_с)/6$ и поверхностного натяжения на шейки капли $F_н = \pi\psi d\sigma_м$, т. е. $G = F_н$. В результате

$$d_к = \sqrt[3]{\frac{6\sigma_э\psi d}{|\rho_д - \rho_с|g}},$$

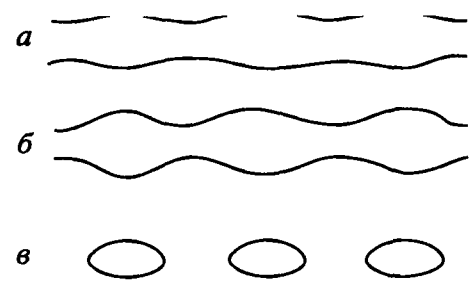


Рис. 6.17. Стадии (*а*–*в*) разрушения цилиндрической струи

где $\rho_д$, $\rho_с$ – плотности соответственно дисперсной фазы и дисперсионной среды.

При увеличении скорости истечения диспергируемой жидкости возрастает сила инерции струи $\frac{\pi d_с^2}{4}\ \rho_д \frac{w^2}{2}$; в момент, когда сила инерции становится равной силе поверхностного натяжения $\pi\psi d_с\sigma_м$, наступает струйный режим диспергирования.

Критическая скорость, при которой капельный режим переходит в струйный, определяется как

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{8\sigma_м\psi}{\rho_д d_с}}, \qquad (6.11)$$

причем отличием ψ от единицы часто пренебрегают.

Строго говоря, скорость $w_{кр}$ в формуле (6.11) рассчитывается в случае ламинарного течения струи. Для развитого турбулентного режима критическая скорость $w_{кр.т}$ рассчитывается по полуэмпирическим формулам. Рабочую скорость w выбирают в интервале $w_{кр} < w < w_{кр.т}$; обычно w находится в интервале 1–4 м/с.

В промышленных установках диспергирование жидкостей ведется через множество отверстий. Для уменьшения эффекта коалесценции капель отверстия истечения размещают на достаточном удалении одно от другого; на практике шаг отверстий обычно превышает $10d_{от}$.

Диаметры струи $d_с$ и отверстия $d_{от}$ связаны между собой через коэффициент сжатия струи α в виде следующего соотношения

$$\frac{\pi d_с^2}{4} \approx \alpha \frac{\pi d_{от}^2}{4} \text{ и } d_с = d_{от}\sqrt{\alpha}.$$

Скорость истечения струи

$$w = \varphi w_и^т = \varphi\sqrt{2gH} = \varphi\sqrt{2\frac{\Delta p}{\rho_д}},$$

где φ – коэффициент скорости; $w_и^т$ – теоретическая скорость истечения, м/с; Δp – напор истечения, Н/м^2.

Объемный расход жидкости при истечении

$$Q = \frac{\pi d_{от}^2}{4}\alpha\varphi\sqrt{2\frac{\Delta\rho}{\rho_д}} = \frac{\pi d_{от}^2}{4}k_\rho\sqrt{2\frac{\Delta\rho}{\rho_д}}.$$

Зависимость коэффициентов скорости φ, сжатия струи α и расхода k_p от критерия $Re^{т}_{и} = \frac{w^{т}_{и} d_{от} \rho_д}{\mu}$ при истечении жидкости из отверстия в тонкой стенке приведены на рис. 6.18. Значения коэффициентов скорости φ и сжатия струи α существенно зависят от толщины стенки сосуда и конструкции насадок. Особенности истечения через отверстия и насадки разной формы и численные значения φ, α и $k_р$ для различных случаев приведены в [14,15].

Средний диаметр образующихся капель d_{32} превышает диаметр струи $d_с$: теоретический анализ приводит к соотношению $d_{32} \approx 1{,}9\ d_с$.

Эмульгирование ижекцией одной жидкости в другую изучалось рядом авторов [10]. Течение струй в этих устройствах сходно с теми процессами, которые происходят при истечении через отверстия и насадки (эмульгирование в гомогенизаторах). Обнаружено, что удельная межфазная поверхность a, как и в случае диспергирования жидкостей механическими мешалками, увеличивается по мере возрастания разности плотностей $\rho_с - \rho_д$ (для прямых эмульсий) или $\rho_д - \rho_с$ (для обратных эмульсий) или уменьшения поверхностного натяжения $\sigma_м$. Установлено, что

$$a - (\Delta p)^{3/4} \sigma^{-5/6} \mu_д^{-1/6}, \qquad (6.12)$$

где Δp — изменение давления при прохождении через сопло; $\mu_д$ — динамическая вязкость дисперсной фазы.

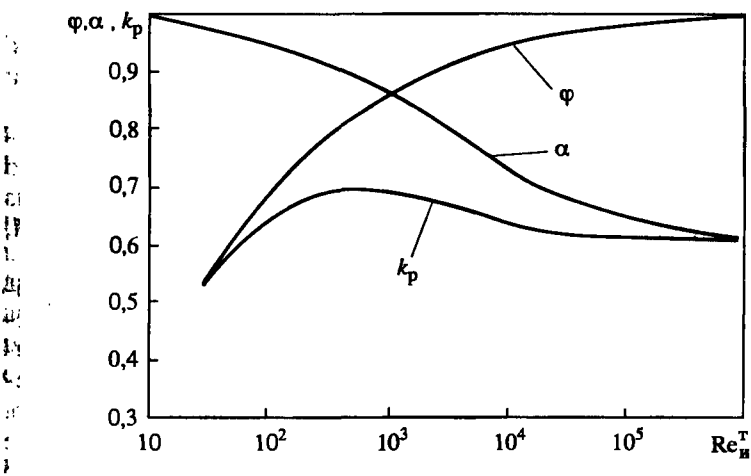


Рис. 6.18. Зависимость коэффициентов скорости φ, сжатия струи α и расхода $k_р$ от числа Рейнольдса $Re^{т}_{и}$

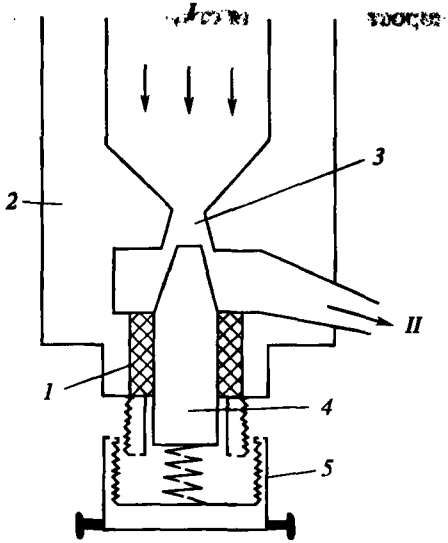


Рис. 6.19. Схема одностадийного гомогенизатора

Выражение (6.12), устанавливающее зависимость между a и Δp, объясняет, почему гомогенизаторы (с их большим значением Δp) столь эффективны при изготовлении эмульсий.

Устройства для струйного диспергирования. К этим устройствам можно отнести: гомогенизаторы, коллоидные мельницы, струйные насосы и форсунки.

Гомогенизаторы условно можно разделить на статические и роторные.

Статические гомогенизаторы – это устройства, в которых диспергирование жидкости достигается пропусканием ее под высоким давлением (до 35–40 МПа) через малые отверстия сечением порядка 10^{-4} см^2 или через узкий зазор специального клапана (рис. 6.19) [10]. Жидкость под большим давлением (*I*) продавливается через кольцеобразную полость между неподвижной стенкой клапана *3*, установленного в станине *2* гомогенизатора, и подвижным коническим стержнем *4*. Стержень перемещается в опоре *1* с помощью винтового механизма *5*; при подаче стержня внутрь кольцевого отверстия площадь его сечения уменьшается. Возникающие в жидкости в кольцевом канале высокие напряжения и большой градиент скорости вызывают разрыв жидкости на капли (*II*).

Промышленностью выпускаются гомогенизаторы различных типов; в некоторых моделях предусмотрена возможность повторного диспергирования. Конический стержень и клапан изготовляются из прочных материалов, например, из закаленных нержавеющих сталей, чтобы не было эрозии под воздействием высокоскоростных струй.

В гомогенизаторах можно диспергировать как жидкости, так и пастообразные материалы. Вследствие использования высокого давления вязкость среды практически не влияет на производительность аппарата. Возрастание температуры в работающих гомогенизаторах незначительное, поэтому обычно не требуется охлаждающее устройство.

Если пропускать через гомогенизатор предварительно смешанные жидкости, то образовываемая эмульсия может иметь размер частиц до 1 мкм даже при однократной обработке. В случае раздельно взятых жидкостей требуется многократное прохождение их через гомогенизатор для получения столь мелких капель.

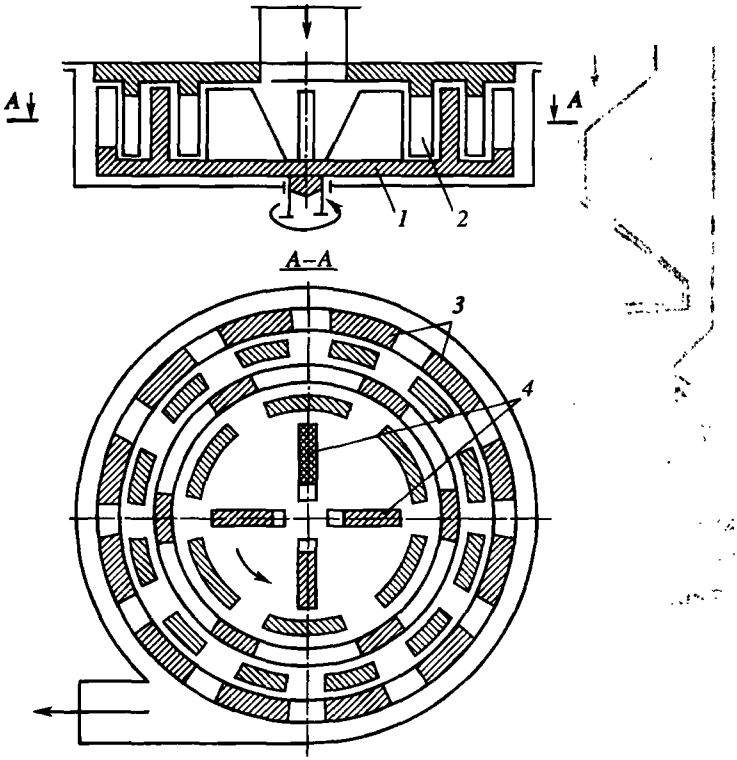


Рис. 6.20. Схема роторно-пульсационного диспергатора

В роторных гомогенизаторах (рис. 6.20) [16] перемешивающее устройство представляет собой быстро вращающийся цилиндрический ротор *1*, расположенный внутри статора *2*; на роторе укреплены зубья *3* и лопасти *4*. На боковой поверхности ротора и статора имеются окна. Перемещаясь через них в радиальном направлении, продукты смешиваются и диспергируются вследствие высокой турбулизации и модуляции (пульсации) потока, сопровождаемых высокочастотными колебаниями и импульсным возбуждением кавитации. Роторные аппараты позволяют получать тонкодисперсные эмульсии (с дисперсностью порядка 10^{-6} м) при относительно низких удельных затратах энергии (~1,5 кВт/м^3).

В коллоидной мельнице (рис. 6.21) эмульгирование происходит при выдавливании жидкости в узкий зазор между ротором *2*, вращающимся с большой скоростью, и неподвижным статором *1*. Смешиваемые жидкости поступают сверху (*I*) через питающее устройство в полость статора, продавливаются через узкий зазор между поверхностями ста-

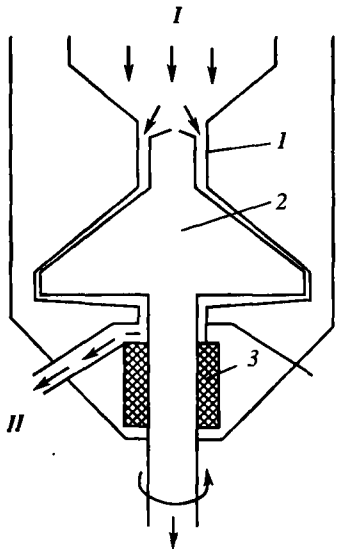


Рис. 6.21. Схема вертикальной коллоидной мельницы

тора и ротора и, наконец, вытекают из мельницы. Частота вращения ротора изменяется от 1000 до 20 000 мин$^{-1}$. Зазор между поверхностями ротора и статора может быть уменьшен до 25 мкм. Вследствие большой скорости и малого зазора в потоке возникают большие касательные напряжения, которые в сочетании с центробежными силами обуславливают почти мгновенный разрыв жидкой струи на капли (*II*). Жидкость поступает в зазор между статором и ротором под действием собственного веса, либо под небольшим избыточным давлением.

Изготавливают различные варианты коллоидных мельниц, например, среди них бывают вертикальные и горизонтальные. Поверхности ротора и статора могут быть как гладкими, так и профилированными – с зубцами и прорезями. Прорези делают радиальными, спиральными или концентрическими, что должно увеличивать турбулентность и интенсифицировать процессы перемешивания и диспергирования. Обычно в конструкциях предусматривают возврат эмульсии и повторное пропускание через мельницу, что дает более тонкое диспергирование.

Диаметр капель в эмульсиях, получаемых с использованием коллоидных мельниц, может составлять порядка 2 мкм.

В настоящее время статор и ротор коллоидных мельниц чаще всего изготовляют из алюминиевых сплавов или нержавеющей стали. Изменение скорости вращения ротора и зазора между ним и статором позволяет использовать один и тот же тип коллоидной мельницы для диспергирования жидкостей с разными физико-химическими свойствами. Производительность промышленных образцов коллоидных мельниц составляет 10–20 000 л/мин. Вследствие больших тепловыделений при течении жидкостей в узком зазоре между ротором и статором во многих конструкциях мельниц предусмотрены устройства для охлаждения.

Энергия в процессе эмульгирования расходуется не только для образования новых поверхностей, но и для преодоления внутреннего трения жидкости и приведения ее в движение. Эта энергия зависит от ряда факторов: физико-химических свойств жидкостей; температуры и давления; используемого эмульгатора; концентрации эмульсий; ти-

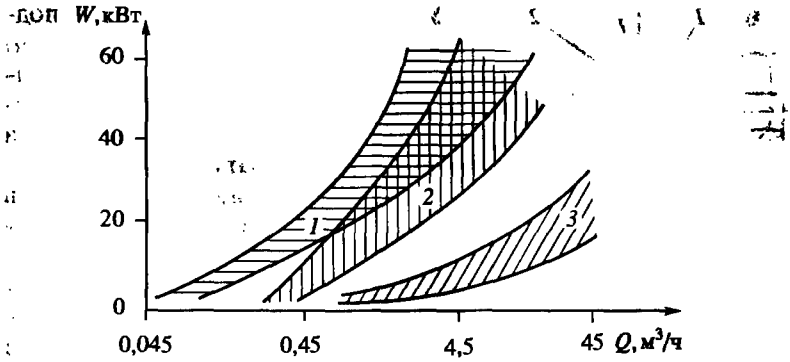


Рис. 6.22. Расход мощности на эмульгирование в различных аппаратах: *1* – коллоидная мельница; *2* – гомогенизатор; *3* – лопастной смеситель

па и производительности устройства диспергирования. На рис. 6.22 [3] ориентировочно показаны области потребляемой мощности в смесителях с механическими мешалками, статических гомогенизаторах и коллоидных мельницах. Как видно из представленных на рис. 6.22 данных, в устройствах с механическими мешалками (*3*) затрачивается значительно меньше мощности, чем в коллоидных мельницах (*1*) или гомогенизаторах (*2*) при той же производительности Q. Поэтому на практике для проведения процессов эмульгирования чаще используют устройства с механическими мешалками. Однако следует отметить, что в смесителях этого типа получают эмульсии с более крупными частицами, чем в аппаратах-гомогенизаторах. Гомогенизаторы потребляют меньше мощности по сравнению с коллоидными мельницами, но они дороже в эксплуатации из-за высоких давлений в потоках жидкости, приводящих к преждевременному изнашиванию элементов конструкций.

Все три рассмотренных типа установок диспергирования дополняются один другим.

В струйных насосах (рис. 6.23) рабочая жидкость (поток ее $G_р$) с большой скоростью вытекает из сопла *1* и поступает в камеру смешения *2*. Из-за увеличения скорости в сечении *I-I* давление в нем (в соответствии с уравнением Бернулли) падает, так что возникает разность давлений (напор) между, например, расходной емкостью *4* и сечением *I–I*. Под действием этого напора жидкость их расходной емкости поступает (поток ее $G_п$) в камеру смешения. После смешивания жидкостей смесь поступает в диффузор *3*. В диффузоре (или камере смешения) скорость потока уменьшается из-за возрастания поперечного сечения, и кинетическая энергия движения переходит в потенциальную энергию давления.

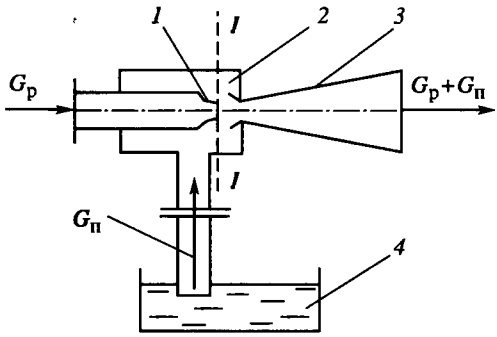


Рис. 6.23. Схема работы струйного насоса

Струйные насосы подразделяются на *инжекторы* (для создания давлений выше атмосферного) и *эжекторы* (для создания вакуума в аппаратах).

Производительность струйных насосов оценивают *коэффициентом инжекции* $\psi_и = G_п/G_р$. Коэффициент инжекции при заданном давлении на выходе из струйного насоса и известных параметрах рабочей и перекачиваемой жидкостей, а также размерах насоса может быть рассчитан из баланса энергий и количества движения потоков. Методика такого расчета подробно изложена в специальной литературе, например [17]. При увеличении развиваемого струйным насосом гидравлического напора H (или Δp) коэффициент инжекции $\psi_и$ уменьшается.

Форсунки для диспергирования жидких сред разделяют по принципу действия на устройства гидравлического и газового распыления (гидравлические и пневматические) и акустические форсунки [18].

В гидравлических форсунках процесс распыления определяется взаимодействием вытекающей струи и окружающей средой. По этому принципу гидравлические форсунки разделяют на следующие группы: струйные, центробежные, центробежно-струйные, ударно-струйные, с соударением струй и комбинированные.

Струйные форсунки представляют собой насадок с цилиндрическим соплом (или несколькими соплами), из которого вытекает струя жидкости *1*, распадающаяся на капли и образующая факел *2* распыла капель (рис. 6.24). К струйным относятся также веерные форсунки, у которых на торцевой стороне насадка выполнены прорези и каналы. В ряде случаев выходное сопло выполнено в виде щели. В этом случае жидкость истекает из сопла форсунки, образуя плоскую струю в виде веера; затем струя распадается на капли.

В центробежных форсунках создается закрутка (показано стрелками) подаваемой через нее жидкости (рис. 6.25). В сопловом канале, вдоль его стенки, жидкость двигается в виде вращающейся пленки, а центр заполняет так называемый воздушный вихрь. При истечении из сопла жидкостная пленка распадается, образуя факел *1* в виде полого конуса.

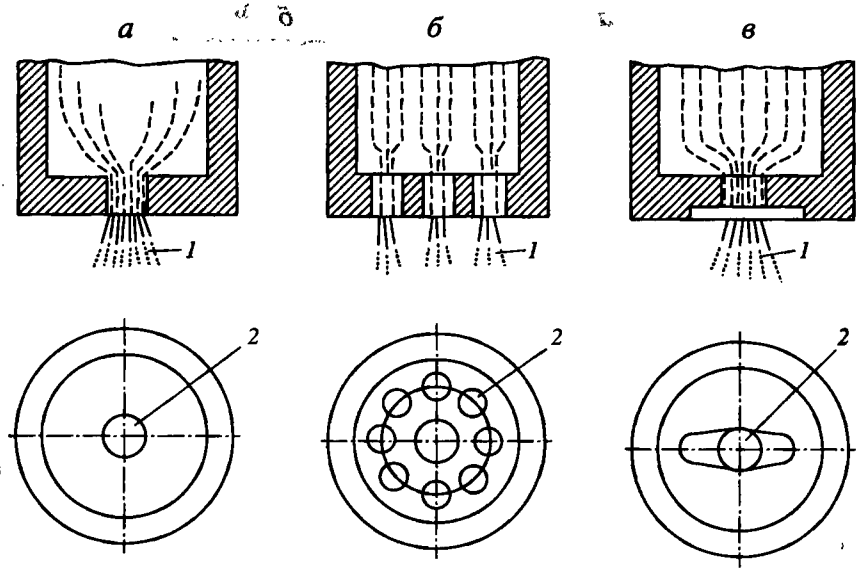


Рис. 6.24. Схемы струйных форсунок:
а – с одним цилиндрическим соплом; *б* – многосопловая; *в* – веерная

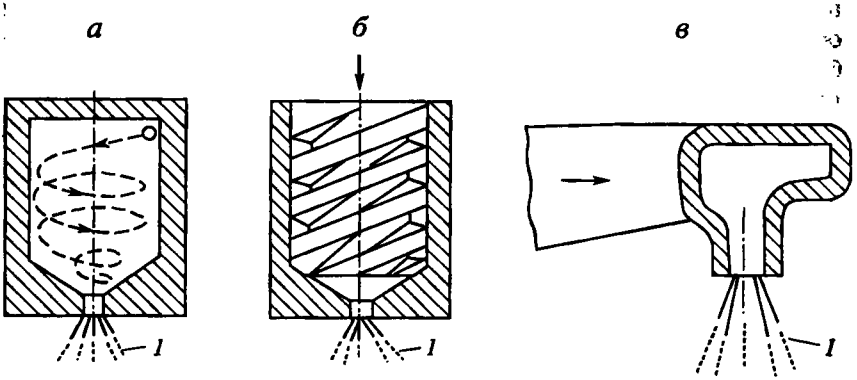


Рис. 6.25. Схемы центробежных форсунок:
а – тангенциальная; *б* – шнековая; *в* – эвольвентная

По способу получения закрутки потока жидкости центробежные форсунки делятся на тангенциальные, с завихрителем-шнеком и спиральные (эвольвентные).

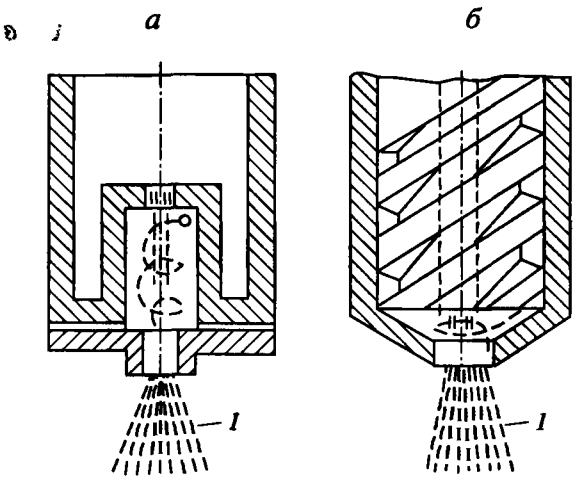


Рис. 6.26. Схемы центробежно-струйных форсунок:
а – тангенциальная; *б* – с винтовой вставкой

Центробежно-струйные форсунки (рис. 6.26) отличаются от центробежных наличием двух потоков подводимой жидкости. Часть жидкости подводится тангенциально в камеру закручивания или проходит по винтовым периферийным каналам вставки, образуя вращающийся поток. Другая часть проходит через центральное отверстие вставки, образуя сплошную струю; при этом ее диаметр должен быть несколько больше внутреннего диаметра кольцевого потока, вращающегося в сопловом канале. За счет взаимодействия вращающаяся жидкость будет закручивать центральную струю, создавая единый поток, который на выходе из сопла образует факел *1* в виде сплошного конуса.

В ударно-струйных форсунках (рис. 6.27) распыливание происходит вне корпуса насадка за счет удара струи об отражатель *1*, расположенный напротив соплового отверстия. В зависимости от конструкции отражателя образуется факел *2* в виде нескольких конусов, как бы вставленных друг в друга. В первом случае отражатель выполняется сплошным и может иметь различные конфигурации, во втором отражатели располагаются друг под другом с отверстиями в центре. У каждого последующего отражателя диаметр отверстия несколько меньше, чем у предыдущего.

Работа *форсунки с соударением струй* (рис. 6.28) основана на взаимном разбивании струй *1* на отдельные капли за пределами их корпуса. Конструктивно форсунки выполняются с одной парой (тройкой и т. д.) сталкивающихся струй или с несколькими парами струй.

Комбинированные форсунки (рис.6.29) составляются из двух или более различных по принципу действия форсунок, объединенных об-

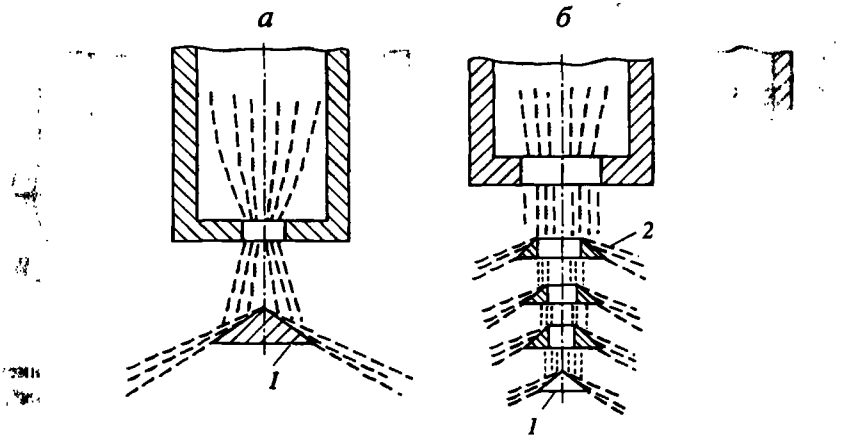


Рис. 6.27. Схемы ударно-струйных форсунок со сплошным (*а*) и многоступенчатым (*б*) отражателями

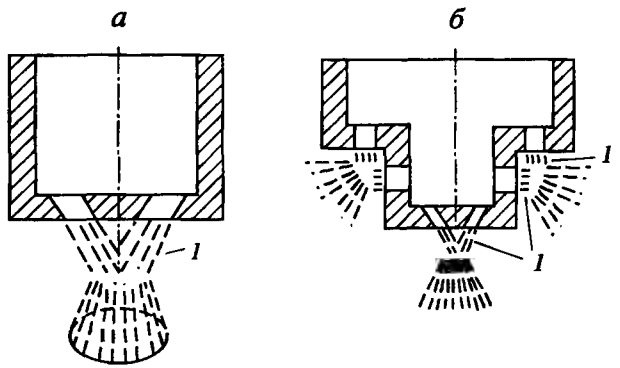


Рис. 6.28. Схемы форсунок с соударением струй:
а – с одной парой соударяющихся струй; *б* – с несколькими парами соударяющихся струй

щим корпусом, в зависимости от требований, предъявляемых к распылению, и условий работы. Чаще всего комбинируются центробежная форсунка и форсунка с соударением струй или центробежно-струйная форсунка и форсунка с соударением струй.

Принцип действия *пневматических форсунок* (рис. 6.30) значительно сложнее, чем гидравлических, поскольку процесс распыления определяется взаимодействием жидкости с распыливающим газом, а также образовавшейся газо-жидкой смеси с окружающей средой.

По характеру движения потоков перед распыливанием пневматические форсунки делят на прямоструйные и вихревые. В прямоструй-

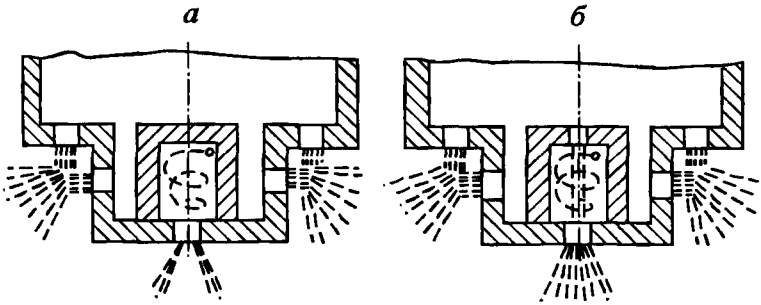


Рис. 6.29. Схемы комбинаций форсунок:
а – центробежной и с соударением струй; *б* – центробежно-струйной и с соударением струй

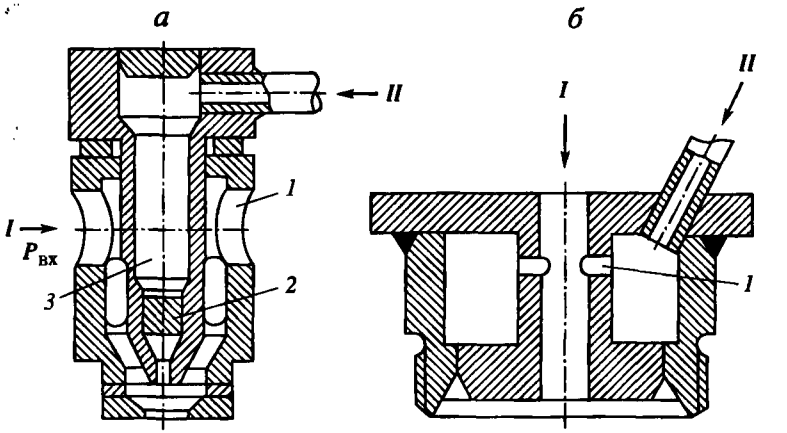


Рис. 6.30. Схемы пневматических форсунок внутреннего (*а*) и внешнего (*б*) смешения:
1 – отверстия; *2* – шнек; *3* – центральный канал; *I* – жидкость; *II* – газ

ных форсунках жидкость и газ вытекают из своих каналов в виде сплошной (цилиндрической, кольцевой или плоской) струи. В вихревых форсунках жидкости или газу, или обоим потокам перед их взаимодействием придается вращательное движение – противоположное или однонаправленное. При этом достигается более высокая степень взаимодействия потоков и становится нетрудно получить факел с требуемыми геометрическими параметрами и характером распределения в нем жидкости.

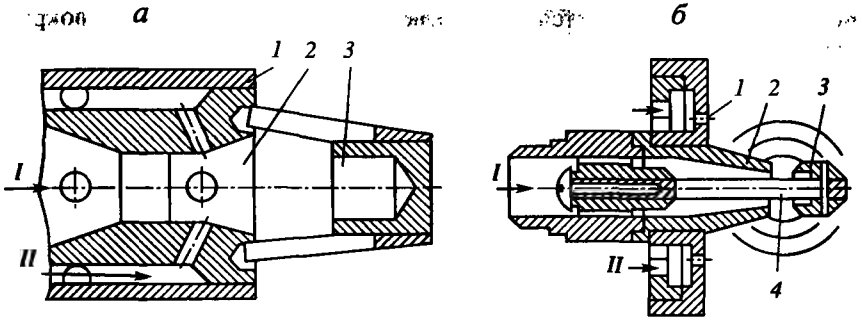


Рис. 6.31. Форсунки со стержневыми излучателями Гартмана:
1 – сопло для жидкости; *2* – вибрирующая пластина

Акустические форсунки представляют собой конструктивное соединение источника акустических колебаний (генератора-излучателя) и устройства для подвода жидкости. Все акустические форсунки различаются между собой типом генератора акустических колебаний и делятся на пять основных групп форсунок: без стержней, со струйным излучателем Гартмана; со статическим или динамическим генератором; с вихревым генератором.

Наиболее перспективные форсунки со струйным излучателем Гартмана (газо-струйные форсунки), обеспечивающие распыливание значительных количеств жидкости при малых давлениях подачи (рис. 6.31). Они характеризуются широким диапазоном регулирования производительности, высокой интенсивностью акустических колебаний, высоким КПД генератора, простотой конструкции и надежностью в эксплуатации.

Форсунка, показанная на рис. 6.31, *а*, имеет корпус *1*, в котором размещено сопло; оно выполнено в виде двух усеченных конусов, обращенных вершинами друг к другу и соединенных между собой цилиндрическим участком. Жидкость (*II*) подводится по кольцевому периферийному каналу и при взаимодействии с газовым потоком образует пленку, толщина которой зависит от давления газа. Акустические колебания в форсунке генерируются направлением сверхзвукового потока газа (*I*) из сопла *2* в полость резонатора *3*. Возникающие в резонансной полости высокочастотные колебания давлений воздуха содействуют процессу диспергирования жидкости.

На рис. 6.31, *б* показана схема форсунки, в которой распыливающий агент (газ *I*) подается в центральную часть корпуса форсунки и через кольцевую щель между газовым соплом *2* и стержнем *4* вытекает в полость между соплом и резонатором *3*. В этой полости генерируются акустические колебания. В зону акустических колебаний дисперги-

руемая жидкость подается через отверстия *1*, расположенные вокруг сопла для подвода газа.

Дополнительные сведения по расчету и конструкциям форсунок для диспергирования и распыливания жидкостей можно найти в работе [18].

Акустическое эмульгирование. В настоящее время наибольшее распространение получили акустические установки, снабженные *гидродинамическими преобразователями* [19]. Получение эмульсий с помощью *пьезоэлектрических* или *магнитострикционных преобразователей* может быть использовано лишь для лабораторных целей или случаев, когда объемы эмульгируемых веществ незначительны.

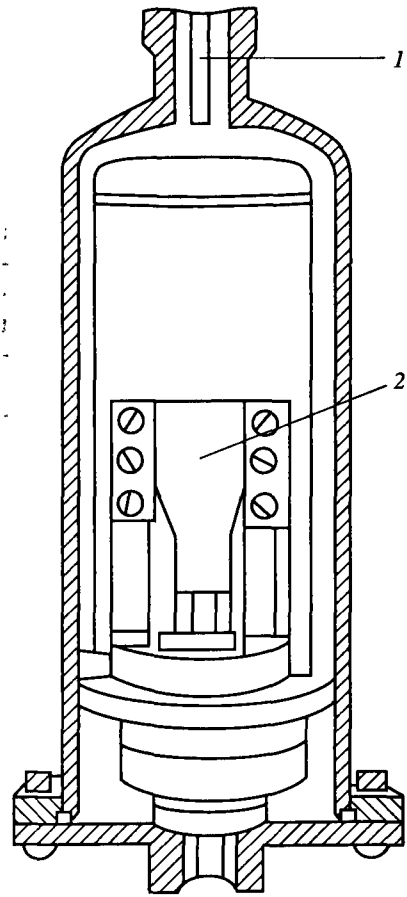


Рис. 6.32. Ультразвуковой преобразователь с консольным креплением вибратора
1 – сопло; *2* – вибрирующая пластина

Перед магнитострикционными и пьезоэлектрическими преобразователями гидродинамические имеют ряд преимуществ: они несложны в эксплуатации, не требуют специальных высокочастотных генераторов и обрабатывают большие объемы жидкости.

Гидродинамические акустические аппараты по конструктивным особенностям можно разделить на две группы: с пластинчатыми или стержневыми резонансными колебательными устройствами и установки роторного типа.

В конструкциях с *пластинчатым колебательным устройством* используются три вида крепления плоской пластины: консольное, в двух точках и центральное. Наибольшее распространение в промышленности получили гидродинамические преобразователи (свистки) с консольным креплением вибратора (рис. 6.32) и с креплением вибратора в двух узловых точках (рис. 6.33).

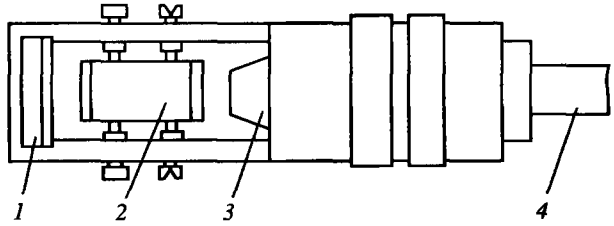


Рис. 6.33. Схема ультразвукового преобразователя с креплением вибратора в двух узловых точках

Работа пластинчатых гидродинамических преобразователей (рис. 6.33) заключается в следующем. Струя жидкости, вытекающая с большой скоростью из узкой щели (сопла) *3*, попадает на пластину *2* с клиновидным краем. При этом происходит срыв с поверхности пластины пограничного турбулентного слоя жидкости и образуются вихри. Турбулентные вихри следуют один за другим, усиливаясь за счет встречного потока от отражателя *1* и создавая чередование периодов давления, вызывающие в жидкости акустические колебания.

Когда частота колебаний жидкости, возникающих в струе, совпадает с частотой колебаний пластины, в системе возникает резонанс. Распространяющаяся от пластины акустическая волна достигает сопла и заставляет колебаться струю жидкости, вытекающую из него, с частотой пластины. Жидкость в трубу *4* гидродинамического преобразователя под давлением подается с помощью шестеренчатых или вихревых насосов.

Гидродинамические излучатели реализуют широкий спектр акустических колебаний интенсивностью 15–30 Вт/см^2 с максимумом энергии на частоте 10–15 кГц. Производительность гидродинамических акустических аппаратов достигает 6–7 м^3/ч обработанной жидкости.

Аппараты с многостержневыми гидродинамическими преобразователями позволяют успешно обрабатывать не только большие объемы жидкости, но и различные суспензии и пастообразные материалы, значительно увеличивая в них поверхность фазовых контактов. Принцип действия этих преобразователей основан на возбуждении колебаний стержней веерообразной струей жидкости, вытекающей из сопла с большой скоростью. Веерообразная струя направляется на заостренные выступы, находящиеся в центре стержней, которые в результате вибрируют с высокой частотой и создают в окружающей среде мощные акустические колебания.

Аппараты с вихревыми гидродинамическими преобразователями эксплуатируются следующим образом. Их работа основана на возбуждении в жидкости акустических колебаний в результате истечения из круглого сопла преобразователя быстро вращающейся струи. Вихре-

вой гидродинамический преобразователь состоит из двух цилиндрических камер различного диаметра. Через отверстия, направленные тангенциально к оси преобразователя, жидкость подается под давлением сначала в камеру большего диаметра, где начинается вращательное движение, а затем в камеру меньшего диаметра, где оно усиливается. В результате из преобразователя выходит прерывистая струя жидкости, излучающая акустические колебания.

Диаметр капель в эмульсиях, получаемых с использованием гидродинамических преобразователей, может составлять порядка 1 мкм и меньше.

Дополнительные сведения об акустическом диспергировании жидкостей и суспензий можно найти в [19–20].

Получение эмульсий электрическими методами. Рассмотренные методы эмульгирования заключаются в эмульгировании достаточно больших объемов жидкости на капли малых размеров с помощью механических, гидродинамических процессов. Оказывается, что такой же эффект может быть достигнут за счет действия сил электрического поля.

Представим, что жидкость, которую нужно диспергировать, помещена в сосуд *2*, оканчивающийся тонким капилляром с внутренним диаметром порядка 1 мм (рис. 6.34). Пусть жидкости через верхний электрод *1* сообщен большой положительный потенциал. По мере увеличения потенциала выходящие из капилляра капли постепенно вытягиваются в струи; при дальнейшем увеличении потенциала нити становятся тоньше и затем распадаются на капли. Радиус образующихся капель составляет порядка 1 мкм; при этом капли заряжены.

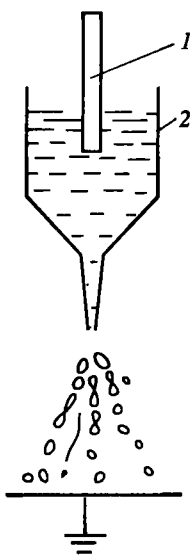


Рис. 6.34. Схема образования капель с помощью электрического диспергирования

Чтобы разобраться в довольно сложном механизме рассматриваемого явления, представим себе сначала сферическую каплю жидкости, находящуюся в электрическом поле. Согласно законам классической электростатики на каплю будет действовать перепад давления Δp (в ньютонах, деленных на 1 м^3) [10]

$$\Delta p = 0{,}5(\varepsilon - 1)^2(2E_н^2 - E_т^2),$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости; $E_н$, $E_т$ – соответственно нормальная и тангенциальная составляющие вектора напряженности

электростатического поля E, $м^{-1/2}\cdot кг^{1/2}\cdot с^{-1}$ (1 В/м = $1/3\cdot10^{-4,5}$ $м^{-1/2}\cdot кг^{1/2}\cdot с^{-1}$).

Под действием силы давления, уравновешенной силой поверхностного натяжения, капля деформируется и принимает форму сфероида, вытянутого вдоль направления вектора напряженности электростатического поля E. По мере увеличения напряженности электрического поля капля становится все более вытянутой в нить и разрывается на более мелкие капли. Радиус образующихся капель

$$r_к = \left(\frac{4\pi r^6 \sigma}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}}, \qquad (6.13)$$

где r – радиус капилляра, м; σ – поверхностное натяжение, Н/м; q – заряд диспергируемой капли, $м^{3/2}\cdot кг^{1/2}\cdot с^{-1}$ (1 к = $3\cdot10^{4,5}$ $м^{3/2}\cdot кг^{1/2}\cdot с^{-1}$).

Как видно из формулы (6.13), с увеличением заряда q деформируемой капли и уменьшением поверхностного натяжения σ радиус образуемых малых капель $r_к$ уменьшается. Конечно, кинематика распада капель достаточно сложна по сравнению с рассматриваемой моделью диспергирования, и образующиеся вновь капли имеют разные размеры в пределах некоторого интервала. Однако порядок средней величины капель, как показали эксперименты [10], согласуется с формулой (6.13).

Электрические методы эмульгирования в настоящее время находятся в стадии развития и совершенствования. Они имеют ряд очевидных преимуществ, из которых главное – высокая степень монодисперсности получаемых эмульсий. Эти методы позволяют также получать эмульсии обоих типов с меньшей концентрацией эмульгатора, чем посредством других методов. Наконец, здесь может быть точно определена концентрация дисперсной фазы.

Однако электрические методы имеют и недостатки. Так, если жидкости обладают относительно большой вязкостью, то эмульгирование затруднено или вообще невозможно. Наличие заряда у капель затрудняет использование этого метода в технологии пожаро- и взрывоопасных технологий, включая и производство ПВВ. Надежных способов нейтрализации зарядов с капель эмульсии для промышленного применения пока не разработано.

Литература

1. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн.1/Под ред. В.Г. Айнштейна. – М.: Химия, 1999. – 888 с.

2. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии.– М.: Химия, 1971. – 784 с.

3. *Васильцов Э.А., Ушаков В.Г.* Аппараты для перемешивания жидких сред. Л.: Машиностроение, 1979. – 272 с.

4. *Ким В.С., Скачков В.В.* Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс. – М.: Химия, 1988. – 240 с.

5. *Бернхардт Э.* Переработка термопластичных материалов. – М.:Химия,1965. – 747 с.

6. *Мак-Келви Д.М.* Переработка полимеров. – М.: Химия, 1965. – 442 с.

7. *Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А.* Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов. – М.: Химия, 1986. – 488 с.

8. *Шенкель Г.* Шнековые прессы для пластмасс. – Л.: ГНТИХЛ, 1962. – 466 с.

9. *Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е.* Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.

10. *Шерман Ф.* Эмульсии. – Л.: Химия, 1972. – 448 с.

11. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука,1970. – 904 с.

12. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с.

13. *Таушер В.* Технология статического смешивания//Химическое и нефтяное машиностроение. 1969. № 3. С. 26–32.

14. *Повх И.Л.* Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1976. – 504 с.

15. *Сиов Б.Н.* Истечение жидкости через насадки в среды с противодавлением. – М.: Машиностроение, 1968. – 139 с.

16. Процессы и аппараты химической технологии. Т.2/Под ред. А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2001. – 600 с.

17. *Соколов Е.А., Зингер Н.М.* Струйные аппараты. – М.: Энергия, 1970. – 288 с.

18. Справочник по распыливающим, оросительным и каплеулавливающим устройствам/А.Н. Чохонелидзе, В.С. Галустов, Л.П. Холпанов, В.П. Приходько. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 608 с.

19. Ультразвуковая технология: Учеб. пособие/Б.А. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский, Н.Н. Хавский. – М.: Металлургия, 1974. – 503 с.

20. *Фридман В.М.* Ультразвуковая химическая аппаратура. – М.: Машиностроение, 1967. – 212 с.

ГЛАВА 7

ТЕПЛОВЫЕ И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

7.1. Кристаллизация расплавов [1–4, 15]

Общие положения. Для многих средств инициирования и взрывания (промежуточные детонаторы, перфораторы, торпеды, сейсмические шашки) используют литые монолитные заряды [1]. Технологический процесс получения литых зарядов из промышленных взрывчатых веществ включает следующие основные операции:

- приготовление расплава;
- заполнение расплавом оболочек (корпусов) или форм;
- охлаждение расплава и кристаллизация;
- охлаждение отвердевшего заряда до температуры окружающей среды.

Для методов заливки с твердой фазой к указанным технологическим операциям добавляются следующие: приготовление твердых компонентов (чешуек, гранул, таблеток, кусков) и заполнение оболочек или форм твердыми компонентами [15].

Расплав индивидуального ВВ приготовляют путем его плавления, а расплавы смесевых ВВ готовят в виде суспензии твердых дисперсных компонентов в расплаве легкоплавкого ВВ.

Оболочки, корпуса или кристаллизационные формы заполняют расплавом или расплавом с твердой дисперсной фазой методами свободной заливки при атмосферном давлении или заливки под воздействием вибрации, при создании вакуума или давления (заливка под давлением). Затем расплав охлаждают для его кристаллизации и отверждения. Тепло при охлаждении и кристаллизации расплава отводится через теплопередающие стенки, поэтому процесс кристаллизации начинается на стенке, а затем граница фронта между твердой и жидкой фазами перемещается во внутренние слои расплава в направлении нормали к охлаждаемой поверхности.

Свойства расплавов, режимы заполнения оболочек и их охлаждение влияют на условия протекания процессов кристаллизации, затвердевания и сопровождающих их явлений. Все это в конечном итоге определяет свойства кристаллической структуры изделий, степень стру-

ктурной неоднородности, плотность и прочность изделий и другие параметры, от которых зависит требуемое качество изделий.

При изготовлении литых зарядов в качестве плавкого ВВ используют тринитротолуол (ТНТ). В смесевых составах промышленных взрывчатых материалов, которые в расплавленном состоянии представляют собой суспензии, ТНТ является дисперсионной (плавкой, жидкой) средой; гексоген, алюминиевый порошок и другие неплавкие компоненты – дисперсной (твердой) фазой.

Выбор соотношения плавких и неплавких компонентов зависит от назначения композиции ВВ. При этом содержание плавкой фазы всегда должно быть больше определенного предела, обеспечивающего текучесть расплава. В некоторых составах в качестве плавкой фазы используют сплав ТНТ с тетранитропентаэритритом (пентолит) [1].

Гексоген используется в качестве основного компонента в смесевых композициях ВВ на основе ТНТ (смеси ТГ) и ТНТ с алюминием (смеси ТГА) для литьевых зарядов фугасного и бризантного действия.

Более подробные сведения о литьевых зарядах ПВВ приведены в работах [1, 15].

Особенности кристаллизации переохлажденных расплавов. Процесс кристаллизации (затвердевания) из расплава сопровождается следующими стадиями: охлаждение расплава, зарождение кристаллов (образование зародышей) и рост кристаллов.

При постепенном охлаждении расплавов индивидуальных веществ температура T в точке кристаллизации в идеале остается постоянной и равной температуре кристаллизации $T_{кр}$ до тех пор, пока весь расплав не закристаллизуется. Дальнейший отвод тепла вызывает, естественно, понижение температуры. Такое поведение расплава наблюдается в тех случаях, когда при температуре кристаллизации в нем сразу появляются центры кристаллизации или когда в расплав при $T_{кр}$ вводят готовые центры кристаллизации (затравки).

Однако на практике ход температурной кривой часто отступает от идеального из-за переохлаждения жидкой фазы ниже точки кристаллизации на величину $\Delta T_{кр}$. Если переохлаждение $\Delta T_{кр}$ невелико, то при появлении центров кристаллизации начинается процесс кристаллизации, и за счет выделяющейся теплоты температура вещества может повыситься до температуры кристаллизации $T_{кр}$. При сильном переохлаждении жидкой фазы количество выделившейся теплоты может оказаться недостаточным для повышения температуры до равновесного значения $T_{кр}$. Способность жидкости к переохлаждению связана с зарождением и ростом кристаллов (эти вопросы рассматриваются ниже). Как известно, при охлаждении расплавов аморфных веществ не происходит выделения теплоты фазового перехода, поэтому в этом случае температура системы монотонно изменяется со временем: увеличивается при нагревании и уменьшается при охлаждении.

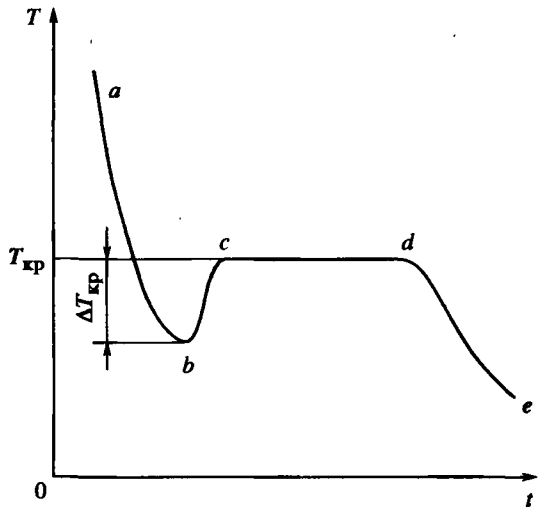


Рис. 7.1. Кривая охлаждения тринитротолуола

При плавлении твердых тел получаются кривые, сходные с кривыми охлаждения. Однако существуют и различия между процессами плавления и затвердевания. Так, кристаллическую фазу практически невозможно перегреть; плавление всегда начинается при достижении температуры плавления. При охлаждении расплава процесс кристаллизации может происходить с переохлаждением и начаться ниже температуры плавления.

Рассмотрим эти особенности охлаждения на примере расплава ТНТ (рис. 7.1).

Температура, при которой происходит переход вещества из жидкого в кристаллическое состояние, называется *температурой кристаллизации* $T_{кр}$. Температура обратного перехода из твердого в жидкое состояние называется *температурой плавления* $T_{пл}$. Как правило, эти температуры для одного и того же кристаллического вещества совпадают, т. е. $T_{кр} = T_{пл}$.

Температура кристаллизации постоянна и характерна для данного вещества при определенном давлении. Эта температура зависит от природы жидкой и возникающей твердой фазы. Так, температура кристаллизации (затвердевания) химически чистого ТНТ при нормальном давлении равна 80, 85 °С.

Некоторые вещества могут образовывать несколько кристаллических фаз, имеющих различное строение (явление *полиморфизма*, см. гл. 2); плавление таких веществ может происходить при разных температурах. Так, сера моноклинной структуры плавится при 112,8 °С, а ромбической структуры при 119 °С.

Внутренняя энергия жидкости выше, чем упорядоченного твердого тела, поэтому переход из одного состояния в другое сопровождается выделением или поглощением энергии. Теплота, выделяющаяся при переходе из одного состояния в другое, сопровождается выделением или поглощением энергии. Теплота, выделяющаяся при переходе жидкости в твердое тело – *теплота кристаллизации* $q_{кр}$, равна и противоположна по знаку *теплоте плавления* $q_{пл}$.

При охлаждении расплава ТНТ (см. рис. 7.1) он остается в жидком состоянии даже при температуре ниже точки кристаллизации; участок *ab* соответствует жидкому состоянию. Таким образом, на участке *ab* ниже температуры плавления расплав находится в состоянии *переохлажденной жидкости.*

Если в переохлажденной жидкости при температуре, соответствующей точке *b*, появится кристаллик, самопроизвольно зародившийся в ней или внесенный извне, то сразу же начинается процесс кристаллизации. За счет выделяющегося тепла (теплота кристаллизации) температура переохлажденной жидкости будет повышаться (отрезок *bc*). При дальнейшем охлаждении расплава температура, равная температуре кристаллизации, остается постоянной до тех пор, пока весь расплав не закристаллизуется (участок *cd*). Разность температуры между точками *c* и *b* характеризует степень переохлаждения расплава; $\Delta T_{кр}$ – *температура переохлаждения.* Когда все вещество закристаллизуется (точка *d*), дальнейший отвод тепла вызывает естественное понижение температуры твердой фазы (участок *de*).

При плавлении твердых кристаллических тел получаются кривые, аналогичные кривым охлаждения. Однако различие между процессами плавления и затвердевания состоит в том, что кристаллическая фаза практически плавится при постоянной температуре. Жидкая фаза начинает образовываться по достижении кристаллами температуры плавления, и эта температура сохраняется до полного перехода твердой фазы в жидкость. Далее температура повышается за счет нагрева расплава.

Зарождение кристаллов при охлаждении расплава может начаться самопроизвольно или может быть вызвано искусственным путем. В первом случае зарождение кристаллов называют *гомогенным*, во втором – *гетерогенным.*

Гомогенное зарождение происходит при отсутствии в расплаве посторонних твердых примесей (частиц), на которых могли бы образовываться кристаллы. Процесс зарождения в данном случае определяется флуктуациями свободной энергии системы. Гетерогенное зарождение происходит на твердых поверхностях, а также на распределенных в расплаве мельчайших инородных частицах.

Направление фазового превращения в системе определяется изменением свободной энергии системы. Из двух фазовых состояний ус-

тойчивым является то, которое обладает меньшей свободной энергией. Поэтому кристаллизация происходит в случаях, когда переход вещества из жидкого в кристаллическое состояние сопровождается уменьшением свободной энергии.

При температуре T выше точки плавления (кристаллизации) вещества удельная свободная энергия жидкой фазы ниже, чем кристаллической, а при $T < T_{кр}$ наблюдается обратная картина. Поэтому при температурах $T > T_{пл}$ более устойчива жидкая фаза, а при $T < T_{пл}$ – кристаллическая фаза. При $T = T_{пл}$ свободные энергии кристаллической и жидкой фаз равны между собой, так что в устойчивом состоянии могут находиться обе фазы.

Зарождение и рост кристаллов. Форма отдельных кристаллов, а также структура кристаллической фазы зависят от физико-химических и теплофизических свойств вещества, интенсивности охлаждения, состава вещества, наличия примесей и т.д. Различают равновесную и реальную форму кристаллов.

Форма равновесных кристаллов определяется строением кристаллической решетки, а также силами связи между ее элементарными частицами – ионами, атомами, молекулами (см. гл. 2). Кристаллы равновесной формы имеют грани с наименьшей поверхностной энергией и, как правило, отличаются относительной простотой.

Форма реальных кристаллов обычно изменяется во времени и сильно зависит от внешних факторов. Чем медленнее растут кристаллы, тем ближе они к своей равновесной форме. При малом переохлаждении кристаллы растут, как правило, сохраняя правильную форму, соответствующую их внутреннему строению. При увеличении переохлаждения скорость роста разных граней может повышаться не в одинаковой мере. Известно, что быстрое переохлаждение расплавов обычно приводит к образованию игольчатых кристаллов: такая форма способствует лучшему отводу тепла от фронта кристаллизации во внешнюю среду.

Под воздействием внешних факторов в кристаллах нередко возникают различные дефекты структуры, что отражается на их форме и физико-механических свойствах.

Форма и размеры кристаллов очень зависят от условий охлаждения расплава. При отверждении расплавов часто возникает задача получения отвержденных продуктов (гранул, чешуек, блоков, отливок) с определенной кристаллической структурой, поскольку последняя определяет прочностные и эксплуатационные свойства приготовляемых из них изделий. Структура отвержденного расплава, как и форма кристаллов, зависит от теплофизических свойств вещества, интенсивности внешнего охлаждения, размеров отливки, наличия примесей и др. Определяющее влияние на структуру получаемого при кристаллизации продукта оказывает соотношение скоростей зарождения и роста

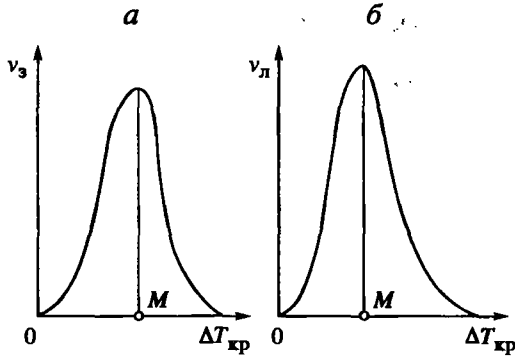


Рис. 7.2. Зависимость скорости зарождения кристаллов (*а*) и линейной скорости кристаллизации (*б*) от переохлаждения расплава

кристаллов. Рассмотрим влияние этих скоростей на структуру продукта для случая квазиизотермической кристаллизации.

Структура кристаллической фазы такова. Кинетику процесса зарождения кристаллов обычно характеризуют вероятностной зависимостью изменения *скорости зарождения кристаллов* $v_з$ (число образующихся зародышей кристаллов в единице объема расплава в единицу времени) от температуры переохлаждения жидкости $\Delta T_{кр}$.

Общий характер поведения зависимости $v_з = f(\Delta T_{кр})$ для расплавов, склонных к переохлаждению, показан на рис. 7.2, *а*. Следует отметить наличие экстремума *M* на указанной кривой. При малом переохлаждении ход кривой определяется главным образом вероятностью образования зародышей, возрастающей по мере переохлаждения. По мере увеличения переохлаждения (правее точки экстремума на рис. 7.2, *а*) наблюдается уменьшение значения $v_з$, что объясняется уменьшением молекулярной подвижности в расплаве, так как часть объема уже занята твердой фазой.

На кинетику процесса зарождения кристаллов влияют многие факторы: наличие нерастворимых и растворимых примесей, механические воздействия, наложение электрических и магнитных полей и др. Следует отметить, что механизм зарождения кристаллов в переохлажденных расплавах исследован еще недостаточно полно.

Для оценки значения критического радиуса зародыша в виде сферы $r_{кр}$ можно воспользоваться выражением [2]

$$r_{кр} = \frac{2\sigma T_{пл}}{\rho_к q_{пл} \Delta T_{кр}}, \qquad (7.1)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе кристаллическая фаза–расплав; $\rho_к$ – плотность кристаллической фазы.

Любой зародыш с радиусом более $r_{кр}$ является центром кристаллизации, способным к росту, так как по мере его роста происходит понижение свободной энергии системы. При радиусе меньше $r_{кр}$ зародыш

неустойчив, поскольку при его росте свободная энергия должна была бы увеличиваться.

Анализ выражения (7.1) показывает, что с возрастанием переохлаждения $\Delta T_{кр}$ радиус $r_{кр}$ уменьшается, что повышает вероятность образования центров кристаллизации. При $T \to T_{пл}$ радиус $r_{кр} \to \infty$, поэтому при малом переохлаждении зарождения кристаллов практически не происходит.

С появлением в переохлажденном расплаве зародышей твердой фазы (центров будущих кристаллов) начинается их рост. Процесс роста реального кристалла настолько сложен, что объяснить все его стороны с единой точки зрения пока не представляется возможным. Современные кинетические воззрения на рост кристаллов, основанные на молекулярно-кинетической теории, удачно дополняются дислокационной теорией [3]. Скорость роста кристаллов обычно характеризуют зависимостью линейной скорости кристаллизации $v_л$ от переохлаждения расплава $\Delta T_{кр}$ (рис. 7.2, *б*). Линейной скоростью кристаллизации называют скорость перемещения границы между расплавом и закристаллизовавшимся веществом в направлении нормали к поверхности раздела фаз. Линейная скорость роста кристаллов $v_л$ при температурах, близких к температуре кристаллизации, равна нулю. Затем при возрастании переохлаждения она увеличивается, достигая максимума, а далее снова постепенно снижается. На линейную скорость кристаллизации влияет довольно большое число факторов: наличие примесей в расплаве, механические воздействия, наложение электрических и магнитных полей и т.п. Под влиянием этих факторов часто изменяется вид кривой $v_л = f(\Delta T_{кр})$, а также положение максимума на этой кривой.

Таким образом, кинетика кристаллизации расплава характеризуется двумя основными параметрами: скоростью образования зародышей в исходном расплаве и линейной скоростью роста кристаллов. Эти параметры определяют в основном структуру получаемых изделий, а также необходимое время для кристаллизации расплава.

Структура получаемого изделия определяется общим числом центров кристаллизации и скоростью роста образовавшихся зародышей и, следовательно, зависит от вида кривых скорости зарождения кристаллов $v_з$ и линейной скорости их роста $v_л$.

При отверждении расплава кристаллического вещества возможны два предельных варианта взаимного расположения кривых $v_з = f(\Delta T_{кр})$ и $v_л = f(\Delta T_{кр})$, как показано на рис. 7.3.

В варианте *а* максимуму скорости $v_з$ соответствует меньшее переохлаждение, чем максимуму $v_л$. Пусть расплав переохлажден на величину ΔT_1, что соответствует максимуму на кривой $v_з$. В этом случае в расплаве вероятнее всего появится большое число зародышей, которые медленно растут. Отвердевший слиток будет иметь *мелкокристаллическую структуру*. При переохлаждении расплава до ΔT_2, что соответст-

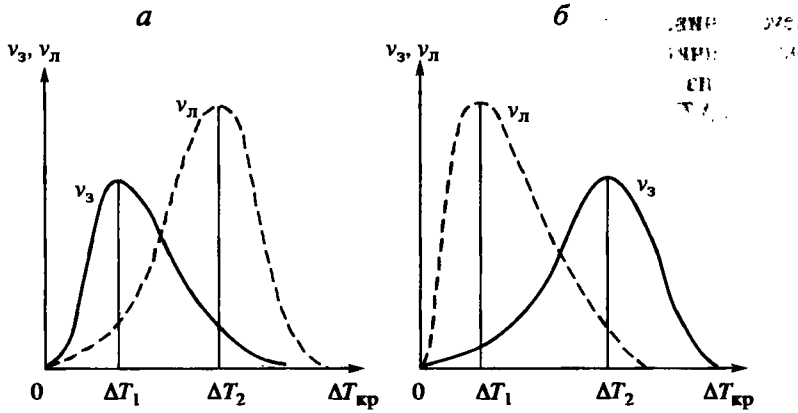


Рис. 7.3. Влияние переохлаждения расплава на структуру кристаллической фазы

вует максимуму на кривой $\nu_л$, появляются немногочисленные зародыши, которые быстро растут. В результате получается *крупнокристаллическая структура.*

Во варианте *б* максимуму $\nu_з$ соответствует большее переохлаждение, максимуму $\nu_л$ – меньшее. В этом случае при переохлаждении до ΔT_1 возникает небольшое число быстрорастущих зародышей; в результате вероятнее всего образуется крупнокристаллическая структура. При более сильном переохлаждении, например, до ΔT_2 образуется большое число медленнорастущих зародышей, и получается мелкокристаллическая структура.

В случае реальной кристаллизации расплава в формах величина переохлаждения расплава изменяется по сечению формы, что, естественно, отражается на структуре отвержденного продукта. Обычно на поверхности отливок, где происходит значительное переохлаждение, вещество состоит из мелких кристаллов, а в центре (малая степень переохлаждения) образуются более крупные кристаллы.

Отверждение индивидуального кристаллического вещества. Кристаллизация (отверждение) расплава при изготовлении литых зарядов обычно производится путем их охлаждения посредством теплопередающих стенок. При этом кристаллизация является типичным нестационарным процессом переносом тепла, скорость которого в общем случае зависит как от интенсивности теплопереноса в системе, так и от скоростей зарождения $\nu_з$ и роста $\nu_л$ кристаллов. Для различных веществ соотношение этих факторов проявляется по-разному.

Для отверждения расплавов веществ с высокими скоростями $\nu_з$ и $\nu_л$ (почти все металлы, бóльшая часть низкомолекулярных органических веществ, в том числе и ТНТ) лимитирующей стадией процесса обыч-

но является интенсивность отвода тепла от растущих кристаллов к охлаждающей стенке [15]. Для таких веществ процесс протекает следующим образом. Первоначально на охлаждаемой стенке, где достигается наибольшее переохлаждение расплава, происходит зарождение центров кристаллизации, образующих при своем росте приповерхностный кристаллический слой. С течением времени *фронт кристаллизации* (граница раздела кристаллической и жидкой фаз) постепенно перемещается в глубь расплава (рис. 7.4) со скоростью, обусловленной интенсивностью отвода теплоты от границы раздела фаз.

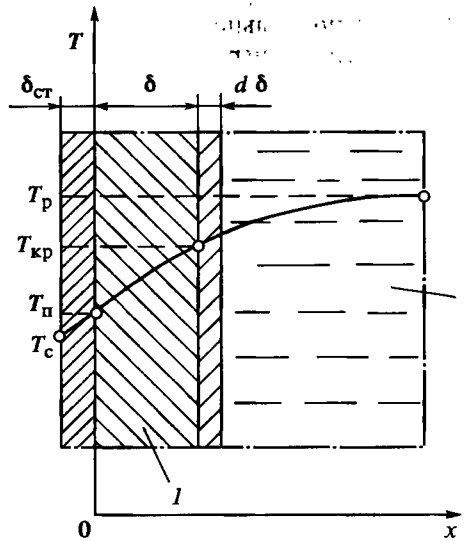


Рис. 7.4. Расчетная схема процесса кристаллизации
1, 2 – соответственно твердая и жидкая фазы

При этом температура на фронте кристаллизации вещества $T_г$ ниже равновесной температуры кристаллизации вещества $T_{кр}$ на величину переохлаждения $\Delta T_{кр} = T_{кр} - T_г$.

Переохлаждение $\Delta T_{кр}$ зависит как от интенсивности отвода теплоты, так и от скоростей $v_з$ и $v_л$. Для веществ с большими значениями $v_з$ и $v_л$ показатель $\Delta T_{кр}$ близок к нулю. Здесь процесс кристаллизации полностью определяется интенсивностью нестационарного теплоотвода от границы раздела к охлаждающей среде, имеющей температуру $T_с$. При этом существуют две возможности *теплопереноса в расплаве* – путем теплопроводности либо конвекцией (с использованием перемешивающих устройств).

Рассмотрим процесс кристаллизации полуограниченного массива перегретого расплава вещества с высокими скоростями $v_з$ и $v_л$, примыкающего к плоской охлаждаемой стенке, для случая, когда перенос теплоты в расплаве происходит *за счет теплопроводности*. Пусть за время τ на стенке толщиной $\delta_{ст}$, изготовленной из материала с теплопроводностью $\lambda_{ст}$, образуется кристаллический слой толщиной δ. Интенсивность внешнего охлаждения характеризуется коэффициентом теплоотдачи $\alpha_с$. Кристаллическая фаза имеет плотность ρ_1, коэффициент теплопроводности λ_1 и коэффициент температуропроводности a_1, а жидкая фаза (расплав) соответственно ρ_2, λ_2, a_2. В этом случае распределение температуры $T_1(x, \tau)$ в кристаллической и $T_2(x, \tau)$ в жидкой

фазах по нормальной к стенке координате описывается уравнениями (4.8) переноса энергии (см. подразд. 4.3) и для однонаправленного потока:

$$\frac{\partial T_1(x,\tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x,\tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0;\ 0 < x < \delta); \tag{7.2}$$

$$\frac{\partial T_2(x,\tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x,\tau)}{\partial \tau^2} \quad (\tau > 0; \delta < x < \infty). \tag{7.3}$$

На перемещающейся границе раздела фаз должно выполняться условие теплового баланса с учетом источника тепла фазового превращения:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\delta,\tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(\delta,\tau)}{\partial x} + q_{кр}\rho_1 \frac{d\delta}{d\tau}. \tag{7.4}$$

Уравнения (7.2) – (7.4) образуют так называемую *задачу Стефана* со следующими краевыми (начальными и граничными) условиями:

начальные условия:

$$\text{при } \tau = 0 \quad T_2(x, 0) = T_р, \quad \delta = 0; \tag{7.5}$$

граничные условия:

$$\text{при } x = 0 \quad T_1(0, \tau) = T_п; \tag{7.6}$$

$$\text{при } x = \delta \quad T_1(\delta, \tau) = T_2((\delta, \tau) = T_{кр}; \tag{7.7}$$

$$\text{при } x = \infty \quad T_2(\infty, \tau) = T_р, \quad \frac{\partial T_2(\infty,\tau)}{\partial x} = 0, \tag{7.8}$$

где $T_р$ – температура перегретого расплава относительно температуры кристаллизации; $T_р > T_{кр}$. $T_п$ – температура кристаллической фазы на охлаждаемой поверхности.

Решение уравнений (7.2)–(7.4) с учетом краевых условий (7.5)–(7.8) дает распределение температуры в кристаллической и жидкой фазах:

$$\frac{T_1(x,\tau) - T_c}{T_{кр} - T_c} = \frac{b + \sqrt{\pi a_1 \tau}\,\mathrm{erf}\left(\dfrac{x}{2\sqrt{a_1\tau}}\right)}{b + \sqrt{\pi a_1 \tau}\,\mathrm{erf}\left(\dfrac{\delta}{2\sqrt{a_1\tau}}\right)},$$

$$\frac{T_p - T_2(x,\tau)}{T_p - T_{кр}} = \frac{\operatorname{erfc}\left(\dfrac{x}{2\sqrt{a_2\tau}}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\dfrac{\delta}{2\sqrt{a_2\tau}}\right)},$$

и скорость изменения толщины кристаллического слоя

$$q_{кр}\rho_1 \frac{d\delta}{d\tau} = \frac{\lambda_1(T_{кр} - T_c)\exp\left(-\dfrac{\delta^2}{4a_1\tau}\right)}{b + \sqrt{\pi a_1\tau}\operatorname{erf}\left(\dfrac{\delta}{2\sqrt{a_1\tau}}\right)} - \frac{\lambda_2(T_p - T_{кр})\exp\left(-\dfrac{\delta^2}{4a_2\tau}\right)}{\sqrt{\pi a_2\tau}\operatorname{erfc}\left(\dfrac{\delta}{2\sqrt{a_2\tau}}\right)}. \qquad (7.9)$$

Здесь b – коэффициент, характеризующий термическое сопротивление со стороны охлаждающей внешней среды $1/\alpha_c$ и охлаждающей стенки $\delta_{ст}/\lambda_{ст}$, $b = \lambda_1\left(\dfrac{1}{\alpha_c} + \dfrac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}\right)$; α_c – коэффициент теплоотдачи от стенки с окружающей средой; $\delta_{ст}$ – толщина стенки; $\lambda_{ст}$ – теплопроводность стенки; $\operatorname{erf}(z)$ – интеграл ошибок (вероятностей), причем $\operatorname{erf}(0) = 0$, $\operatorname{erf}(\infty) = 1$; $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$; z – аргумент, стоящий под знаком функций erf и erfc, значения которых затабулированы [4, 5].

Дифференциальное уравнение (7.9) позволяет определить скорость кристаллизации при достаточно общей постановке рассматриваемой задачи. Это уравнение относительно функции $\delta = f(\tau)$ решают численными методами. При определенных допущениях из уравнения (7.9) можно получить ряд более простых частных зависимостей. Так, если теплообмен охлаждаемого изделия с окружающей средой осуществляется при условиях, когда $\alpha_c \to \infty$, $\lambda_{ст}/\delta_{ст} \to \infty$ и $T_п = \text{const}$ (в теплопередаче – граничные условия первого рода), то уравнение (7.9) приобретает вид

$$\delta = \beta\sqrt{\tau},$$

где β – корень трансцендентного уравнения.

Скорость изменения

$$q_{кр}\rho_1\frac{\delta}{2}=\frac{\lambda_1(T_{кр}-T_c)\exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_1}\right)}{\sqrt{\pi a_1}\,\mathrm{erf}\frac{\beta}{2\sqrt{a_1}}}-\frac{\lambda_2(T_p-T_{кр})\exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_2}\right)}{\sqrt{\pi a_2}\,\mathrm{erfc}\frac{\beta}{2\sqrt{a_2}}}. \qquad (7.10)$$

Для неперегретого расплава, когда $T_p = T_{кр}$, в граничных условиях первого рода ($T_п = T_c$), разлагая в уравнении (7.10) функции exp и erf в ряды и ограничиваясь их первыми членами, получим наиболее простую зависимость

$$\delta=\sqrt{\frac{2\lambda_1(T_{кр}-T_c)\tau}{q_{кр}\rho_1}}. \qquad (7.11)$$

Если в уравнении (7.11) при $\tau = \tau_{кр}$ (здесь $\tau_{кр}$ – время полного отверждения расплава) $\delta = L$ (L – толщина изделия), то

$$\tau_{кр}=\frac{q_{кр}\rho_1 L^2}{2\lambda_1(T_{кр}-T_c)}. \qquad (7.12)$$

В случае кристаллизации расплава в цилиндрической форме с внутренним радиусом $R_ц$ время полного отверждения расплава можно оценить как

$$\tau_{кр}=\frac{q_{кр}\rho_1 R_ц^2}{4\lambda_1(T_{кр}-T_c)}. \qquad (7.13)$$

При кристаллизации расплава в сферических формах с внутренним радиусом $R_{сф}$ время полного отверждения расплава можно оценить как

$$\tau_{кр}=\frac{q_{кр}\rho_1 R_{сф}^2}{6\lambda_1(T_{кр}-T_c)}. \qquad (7.14)$$

В случае кристаллизации расплавов в формах, имеющих сложную геометрию внутренней поверхности, в расчетах по формулам (7.12)–(7.14) следует подставлять наибольший внутренний размер формы.

Необходимо отметить, что приведенные выше теоретические решения получены для отверждения расплавов, в которых отсутствуют предварительно погруженные твердые тела (частицы). При отверждении расплавов, представляющих собой суспензии с твердыми дисперсными частицами – центрами кристаллизации, время отверждения отливки будет меньше, чем рассчитанное по формулам (7.12)–(7.14).

Взрывчатые вещества (ТНТ, пикриновая кислота и др.) имеют малую теплопроводность и при затвердевании на 8–10% уменьшают объем (происходит так называемая *усадка*). В силу малой теплопроводности твердый слой, образовавшийся у стенок формы и с поверхности, затрудняет теплообмен, и процесс кристаллизации во время отверждения протекает крайне медленно. Например, залитая 122-миллиметровая форма охлаждается около 10 ч [15]. Малая скорость кристаллизации ведет к образованию крупных кристаллов; получается отливка с крупнокристаллической структурой и, следовательно, с небольшой плотностью. Поэтому при получении разрывных литых зарядов применяют ряд специальных мероприятий.

Мелкокристаллическую и плотную отливку можно получить, если перед заливкой в расплав ввести кристаллы или чешуйки того же взрывчатого вещества, т. е. создать *искусственные центры кристаллизации* [15].

Чтобы избежать образования в литом заряде усадочных раковин и трещин (для относительно больших по объему изделий), используют кристаллизацию в несколько приемов (*многоразовая заливка*).

Дополнительные сведения по теории и технике кристаллизации многокомпонентных систем и кинетики кристаллизации можно найти в работах [2, 3].

Охлаждение литых изделий. Процесс отверждения расплава в форме завершается охлаждением кристаллического тела ниже температуры кристаллизации $T_{кр}$; обычно охлаждение ведется до температуры окружающей среды $T_с$ производственного помещения.

Теоретическое описание нестационарного процесса охлаждения твердого тела осложнено тем, что его началу соответствует некоторое распределение температуры в изделии, создавшееся в конце стадии кристаллизации.

В соответствии с известным решением задачи охлаждения бесконечного сплошного круглого цилиндра радиусом $R_ц$, имеющего в начальный момент времени $\tau = 0$ постоянную по всему объему температуру $T_{кр}$, изменение температуры на оси цилиндра T в зависимости от времени τ запишется следующим образом:

$$\frac{T - T_с}{T_{кр} - T_с} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_1(\mu_n)}{\mu_n[I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)]} \exp(-\mu_n^2 \mathrm{Fo}), \qquad (7.15)$$

где $I_0(\mu_n)$, $I_1(\mu_n)$ – функции Бесселя первого рода соответственно нулевого и первого порядков; Fo – критерий Фурье; $\mathrm{Fo} = a_1\tau/R_ц^2$; μ_n – корни следующего характеристического уравнения:

$$\frac{I_0(\mu)}{I_1(\mu)} = \frac{\mu}{\mathrm{Bi}}, \tag{7.16}$$

где Bi – критерий Био; $\mathrm{Bi} = \alpha R_{\text{ц}}/\lambda_1$; α – коэффициент теплообмена между стенкой формы и охлаждающей средой.

В практических условиях охлаждения твердого тела критерий $\mathrm{Bi} = 50 \div 100$, что теоретически соответствует условию $\mathrm{Bi} \to \infty$, т. е. при охлаждении формы можно воспользоваться условием теплообмена первого рода, когда температура стенки формы (поверхности цилиндра) принимается постоянной и равной температуре окружающей среды $T_{\text{с}}$. Для этого случая уравнение (7.15) принимает вид

$$\frac{T - T_{\text{с}}}{T_{\text{кр}} - T_{\text{с}}} = 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\mu_n^2 \mathrm{Fo})}{\mu_n I_1(\mu_n)}. \tag{7.17}$$

Если в уравнении (7.17) ограничиться первым членом ряда (при этом погрешность не превышает 1%), то получим следующее выражение для определения времени охлаждения $\tau_{\text{ох}}$ оси цилиндрического изделия радиуса $R_{\text{ц}}$ от начальной температуры $T_{\text{кр}}$ до конечной температуры $T_{\text{к}}$ при поддержании стенки формы при температуре $T_{\text{с}}$

$$\tau_{\text{ох}} = \frac{0{,}17 R_{\text{ц}}^2 \ln(1{,}61\theta_{\text{к}})}{a_1}, \tag{7.18}$$

$\theta_{\text{к}} = (T_{\text{к}} - T_{\text{с}})/(T_{\text{кр}} - T_{\text{с}})$; обычно принимают $T_{\text{к}} = 20 \div 25$ °С.

Для расчета времени охлаждения сферических тел воспользуемся известным решением задачи для охлаждения сплошной сферы радиусом $R_{\text{сф}}$, имеющей в начальный момент времени $\tau = 0$ постоянную по объему температуру $T_{\text{кр}}$.

Используя те же допущения, что и для бесконечного цилиндрического тела, получим следующее выражение для определения времени охлаждения $\tau_{\text{ох}}$ центра сферического тела от начальной температуры $T_{\text{кр}}$ до конечной температуры $T_{\text{к}}$ при условии постоянства температуры на стенки формы (наружной поверхности сферы) $T_{\text{с}}$:

$$\tau_{\text{ох}} = \frac{0{,}1 R_{\text{сф}}^2 \ln(2\theta_{\text{к}})}{a_1}. \tag{7.19}$$

Для расчета времени охлаждения плоских тел толщиной L при одностороннем отводе тепла воспользуемся известным решением задачи охлаждения пластины, когда ее толщина мала по сравнению с длиной и шириной (случай неограниченной пластины).

При соблюдении рассмотренных выше допущений время охлаждения τ_{ox} наружной стороны (противоположной отводящей тепло поверхности) плоского тела от начальной температуры $T_{кр}$ до конечной температуры $T_к$ при постоянной температуре $T_с$ отводящей тепло стенки формы будет определяться как

$$\tau_{ox} = \frac{0,4L^2 \ln(1,27\theta_к)}{a_1}. \qquad (7.20)$$

Продолжительность процесса приготовления литых изделий – продолжительность цикла

$$\tau_ц = \tau_з + \tau_{кр} + \tau_{ox} + \tau_{из}.$$

Время заливки ($\tau_з$) зависит от выбранного технологического процесса заливки (одно-, многоразовая и др.); время извлечения изделий из форм ($\tau_{из}$) определяется производительностью используемого для этих целей оборудования. Для определения времени кристаллизации $\tau_{кр}$ и времени охлаждения τ_{ox} твердых тел различной формы (плоских, цилиндрических, сферических) могут быть рекомендованы рассмотренные ранее теоретические зависимости.

Дополнительные сведения по теории теплопроводности можно найти, например, в работах [6, 16].

Аппараты для кристаллизации расплавов. Аппараты для отверждения расплавов весьма разнообразны в конструктивном отношении и по принципу действия. Это объясняется большим разнообразием свойств отверждаемых расплавов и требований к готовому продукту. Остановимся на наиболее распространенных конструкциях аппаратов для отверждения расплавов в формах.

Отверждение расплавов в формах производится с целью получения отливок (блоков) определенного размера той или иной формы, а также для изготовления различных изделий.

Процесс отверждения расплавов в формах обычно протекает следующим образом. Исходный расплав заливают в охлаждаемую форму, где он после отверждения продолжает охлаждаться до определенной температуры. Далее полученную отливку извлекают из формы, и операция повторяется. Рассматриваемый процесс можно осуществить различными способами в зависимости от теплофизических свойств расплава, размеров отливки, требований к продукту: искусственным охлаждением жидким хладоагентом через стенку (при получении крупных отливок); искусственным охлаждением путем обдувания холодным воздухом (при получении мелких отливок); естественным охлаждением за счет конвективной и лучистой теплоотдачи в окружающую среду (при получении относительно мелких отливок); за счет

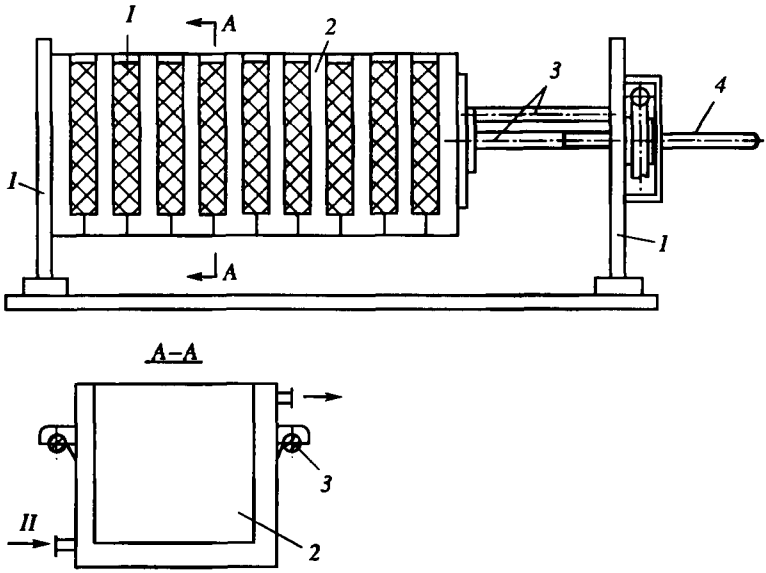


Рис. 7.5. Схема конструкции секционного охладителя расплава

теплоотдачи расплава материалу самой формы (при использовании массивных металлических форм).

Рассмотрим некоторые устройства, используемые для отверждения расплавов в охлаждаемых формах.

Секционный охладитель расплавов (рис. 7.5) состоит из комплекта вертикальных охлаждаемых плит *2*, расположенных на двух горизонтальных цилиндрических опорах *3*, двух массивных опорных стоек *1* и зажимного механизма *4*. Перед заливкой расплава плиты прижимают друг к другу с помощью винтового или гидравлического механизмов. При этом охлаждаемые плиты образуют прямоугольные полости, в которые сверху заливается расплав *I*. Плиты снабжены внутренними каналами, по которым циркулирует охлаждающая жидкость *II*. После охлаждения отливок плиты раздвигают, и образовавшиеся отливки твердого материала извлекаются. После возможно необходимой чистки внутренней литниковой поверхности форм или нанесения антиадгезионного покрытия процесс повторяется. Толщина получаемых блоков обычно составляет до 100–200 мм. Продолжительность процесса охлаждения часто составляет несколько часов.

Производительность установки для охлаждения расплава в формах

$$G = mV_{\text{ф}}\rho_{\text{к}}/\tau_{\text{ц}},$$

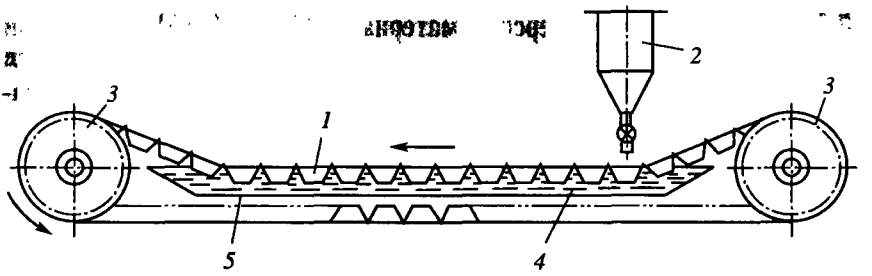


Рис. 7.6. Схема конструкции установки конвейерного типа для отверждения расплава в виде блоков

где m – число форм; $V_ф$ – объем формы; $\rho_к$ – плотность отвердевшего продукта; $\tau_ц$ – продолжительность цикла приготовления литых изделий.

Отверждение расплавов в аппаратах секционного охлаждения является периодическим и малопроизводительным процессом. С целью механизации и автоматизации данного процесса его часто осуществляют на установках конвейерного или карусельного типа.

Установка конвейерного типа (рис. 7.6) обычно представляет собой транспортер, между приводными цепями которого расположены формы *1*. Цепи надеты на приводные звездочки *3*. Под верхней ветвью транспортера расположена охлаждающая ванна *5* с проточной водой *4*, в которую при движении формы погружается нижней своей частью. Расплав заливают на входе формы в охлаждающую ванну устройством *2*. После отверждения расплава формы опрокидываются и из них выпадает образовавшийся блок отливки. В некоторых случаях для облегчения извлечения отливок из форм предусматривается специальное выталкивающее устройство.

При использовании *карусельных установок* формы располагают на круглом вращающемся столе, при повороте которого на определенные позиции происходит последовательно заполнение форм расплавом, кристаллизация, охлаждение отливок и их извлечение.

Производительность установок конвейерного типа

$$G = NV_ф\rho_к,$$

где N – число форм, заливаемых расплавом в единицу времени.

Дополнительные сведения по конструкциям аппаратов для кристаллизации расплавов можно найти в работах [3, 15].

7.2. Сушка твердых дисперсных материалов [1, 4, 14, 15]

Способы сушки. Наиболее распространенным способом удаления влаги из твердых влажных материалов является тепловая сушка.

Тепловой сушкой или просто *сушкой* называют процесс удаления влаги из твердых влажных материалов путем ее испарения и отвода образующихся паров.

Сушка в технике осуществляется двумя основными способами:

нагреванием влажных материалов теплоносителем через твердую непроницаемую перегородку – так называемая *контактная сушка*;

нагревание влажных материалов путем непосредственного контакта с газовым теплоносителем (например, подогретым воздухом) – так называемая *газовая* или *воздушная сушка*; в большинстве случаев в качестве высушиваемого газа применяют воздух.

Иногда тепло подводится к высушиваемому материалу токами высокой частоты (*диэлектрическая сушка*) или инфракрасными лучами (*радиационная сушка*).

Часто сушку совмещают с другими технологическими процессами, например, с грануляцией, измельчением, классификацией и др.

Условия сушки. Окружающая влажный материал среда содержит либо водяной пар, либо смесь водяного пара с газами. Обозначим давление водяного пара, когда он является только окружающей средой, через $p_{\text{п}}$, а парциальное давление его в смеси с газами окружающей среды $p_{\text{пар}}$. В дальнейшем будем считать, что окружающая среда содержит только водяной пар.

Содержащейся в материале влаге соответствует определенное равновесное давление водяного пара над влажным высушенным материалом $p_{\text{м}}$.

Условию сушки, т. е. переносу влаги из твердого материала в окружающую среду, будет соответствовать неравенство $p_{\text{м}} > p_{\text{п}}$.

Давление водяного пара над высушиваемым материалом $p_{\text{м}}$ зависит от влажности материала, температуры и характера связи влаги с материалом.

С ростом влажности материала и температуры значение $p_{\text{м}}$ возрастает. Зависимость давления пара влаги над поверхностью материала от его влажности определяется типом связи влаги с материалом. Различные формы связи влаги с дискретными частицами твердого материала были рассмотрены в гл. 2.

Влажность материала, отвечающая условиям $p_{\text{м}} = p_{\text{п}}$, соответствует достижению динамического равновесия, когда процесс межфазного переноса влаги в целом не идет.

Таким образом, разность $(p_{\text{м}} - p_{\text{п}})$ может трактоваться как одно из выражений движущей силы процесса сушки. В зависимости от знака этой движущей силы перенос влаги может идти от твердого тела к су-

шильному агенту или в обратном направлении – из окружающей среды в твердое тело.

Если $(p_м - p_п) > 0$, то происходит высушивание влажного материала, а само неравенство есть условие сушки.

Если $(p_м - p_п) < 0$, то происходят адсорбция влаги из окружающей среды и увлажнение твердого материала. Этот процесс обратной сушки твердого материала используется при осушении газов (в данной книге он не рассматривается).

Из изложенного следует, что для процесса сушки твердого материала необходимо создать и поддерживать в технологическом аппарате условие $p_м > p_п$.

Материальный и тепловой балансы сушки. Обозначим количество влажного материала, поступающего на сушку, через G_1, количество высушенного материала – G_2, начальную и конечную влажность материала соответственно через C_1 и C_2, а количество влаги, удаляемой при сушке, через W.

Опуская промежуточные выкладки, изложенные, например в [12], в окончательном виде получим следующие выражения *баланса влаги в высушиваемом газе*

$$W = G_1(C_1 - C_2)/(100 - C_2) \qquad (7.20)$$

и

$$L = W/(\bar{X}_2 - \bar{X}_1),$$

где L – расход абсолютно сухого воздуха, кг/ч; $\bar{X}_2$. $\bar{X}_1$ – абсолютные влажности воздуха соответственно на выходе и входе в сушилку, выраженные в 1 кг влаги на 1 кг абсолютно сухого воздуха.

Тепловой баланс контактной сушки[1] рассчитывается следующим образом. При контактной сушке расход тепла на нагрев материала от начальной температуры $T_н$ до начальной температуры сушки $T_{с.н}$

$$Q_н = G_2 c_с (T_{с.н} - T_н) + W c_в (T_{с.н} - T_н) + Q_{п.н},$$

где $c_с$, $c_в$ – теплоемкости соответственно высушенной части материала и влаги; $Q_{п.н}$ – теплопотери в окружающую среду при нагревании материала.

Расход тепла при собственно сушке до конечной температуры $T_{с.к}$

$$Q_с = G_2 c_с (T_{с.к} - T_{с.н}) + W(H - c_в T_{с.н}) + Q_{п.с},$$

[1] Приводятся конечные выражения теплового баланса, подробно рассмотренного в [12].

где $T_{с.к}$ – конечная температура сушки; H – энтальпия водяных паров, образующихся при сушке; $Q_{п.с}$ – потери тепла в окружающую среду при сушке.

Тепловой баланс воздушной сушки рассчитывается следующим образом. Допустим, что на высушивание поступает влажный материал в количестве (G_2 + W); одновременно в сушильную камеру могут вводиться транспортные приспособления (ленточный транспортер и др.) в количестве $G_т$. Кроме того, в сушилку вводится L абсолютно сухого воздуха. Для подогрева воздуха вначале в калорифере, а затем в сушильной камере к нему подводится количество тепла соответственно $Q_к$ и $Q_д$. Расход тепла на сушку $Q = Q_к + Q_д$.

Все расходы тепла отнесем к 1 кг испаряемой при сушке влаги и обозначим удельные расходы как

$$q_к = Q_к/W;\quad q_д = Q_д/W;\quad q = Q/W = q_к + q_д,$$

то

$$q_к = L(H_1 - H_0) = (H_1 - H_0)/(\bar{X}_2 - \bar{X}_1),$$

$$q_д = (H_2 - H_1)/(\bar{X}_2 - \bar{X}_1) + q_м + q_т + q_п - c_в T_{м.н},$$

$$q = H_2 - H_0/(\bar{X}_2 - \bar{X}_1) + q_м + q_т + q_п - c_в T_{т.н},$$

где H_0, H_1, H_2 – энтальпия воздуха соответственно на входе в сушильную камеру, после нагревания в калорифере и после выхода из сушильной камеры, Дж/кг сухого воздуха; $q_м = [G_2 c_с(T_{м.к} - T_{м.н})]/W$; $q_т = [G_2 c_т(T_{т.к} - T_{т.н})]/W$ (здесь $c_т$ – теплоемкость транспортных приспособлений, Дж/(м^3·К); $T_{м.н}$, $T_{м.к}$ – температуры материала, поступающего соответственно на сушку и после сушки, °С; $T_{т.к}$, $T_{т.н}$ – температуры транспортных средств, соответственно на выходе из сушильной камеры и при входе в нее, °С).

Если в сушилке отсутствуют транспортные устройства (например, в барабанных сушилках), то $q_т = 0$. При сушке без дополнительного подогрева воздуха после калорифера следует считать, что $q_д = 0$.

Кинетика сушки. Определение времени сушки твердого материала и площади поверхности контакта, обеспечивающее проведение процесса с заданной производительностью до обусловленной выходной влажности твердого материала, составляют предмет *кинетики процесса.*

Скорость процесса сушки зависит от множества факторов: природы высушиваемого материала и влаги (в общем случае и сушильного агента); температуры и скорости движения потока сушильной среды над поверхностью твердого материала; размеров, формы, а также внутренней структуры и диапазона влажности материала. Удаление влаги различных типов связности с твердым телом имеет свои особенности, которые выявляются при построении *кинетических кривых процесса.*

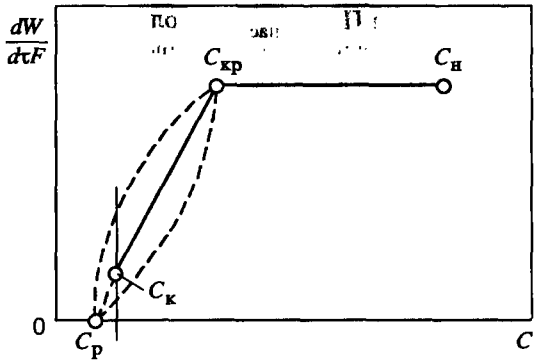


Рис. 7.7. Кривая скорости сушки

Кривая скорости сушки представляет собой зависимость количества влаги dW, удаляемой с единицы поверхности F в единицу времени $d\tau$, т. е. $dW/Fd\tau$ в зависимости от влажности материала C (кг/кг сухого материала).

Как показывают опыты, при сушке влажных материалов в большинстве случаев скорость сушки существенно зависит от изменения влажности материала. При этом наблюдаются типичные периоды сушки. В начале процесса скорость сушки оказывается постоянной, не зависящей от влажности материала (рис. 7.7). Этот *период постоянной скорости* или *первый период* характерен тем, что удаляется лишь свободная влага. Процесс сушки на этом этапе лимитируется законами диффузии влаги от поверхности твердого тела в газовый поток сушильного агента, и в одинаковых условиях кривые скорости сушки совпадают для разных материалов. Первому периоду на рис. 7.7 соответствует горизонтальный участок в диапазоне $C_н - C_{кр}$ (начальная влажность–критическая влажность); эффекту прогрева материала на начальной стадии сушки соответствует условная линия при $C = C_н$. Заканчивается первый период времени при достижении некоторой критической влажности $C = C_{кр}$, когда диффузионное сопротивление внутри материала становится соизмеримым с диффузионным сопротивлением во внешней газовой области.

Кинетический закон для первого периода выражается следующими уравнениями:

$$W = \beta_x F(\bar{X}_{нас} - \bar{X})$$

или

$$W = \beta_p F(p_{нас} - p), \qquad (7.21)$$

где W – количество испаренной влаги, кг/ч; F – поверхность фазового контакта, м^2; β_x – коэффициент массоотдачи, кг/(м^2·ч·кг/кг сухого

воздуха); β_p – то же, кг/(м^2·ч·Па); $\overline{X}_{нас}$ – абсолютная влажность насыщенного воздуха в условиях сушки, кг/кг сухого воздуха; $\overline{X}$ – действительная (рабочая) абсолютная влажность воздуха, кг/кг сухого воздуха; $p_{нас}$ – парциальное давление водяного пара в насыщенном в условиях сушки воздухе, Па; p – действительное парциальное давление водяного пара в воздухе, Па.

При влажности материала $C < C_{кр}$ наступает *второй период сушки* или *период уменьшающейся скорости.* Для этого периода характерно то, что диффузионное сопротивление во внешней области становится вначале соизмеримым с диффузионным сопротивлением внутри высушиваемого материала, а затем значительно меньше его. На этом периоде скорость процесса сушки определяется скоростью перемещения влаги в твердой фазе (скоростью массопроводности).

Кинетический закон для второго периода часто выражаются уравнением

$$W = KF(C - C_p), \qquad (7.22)$$

где K – коэффициент скорости сушки, кг/(м^2·ч·кг/кг сухого материала); F – площадь высушиваемой поверхности, м^2; C – влажность материала в данный момент, кг/кг сухого материала; C_p – равновесная влажность материала, кг/кг сухого материала.

Следует отметить, что кинетический закон в форме уравнения (7.22) описывает явление лишь приближенно. Действительное изменение скорости сушки в пределах изменения влажности в диапазоне $C_{кр}-C_p$ (критическая влажность–конечная, равновесная влажность) может и не следовать линейному закону (штриховые линии на рис. 7.7).

В случаях, когда в процессе сушки поверхность частиц высушиваемого материала покрывается твердой коркой, скорость процесса уменьшается и выражается на графике рис. 7.7 штриховой кривой, расположенной ниже сплошной прямой линии $C_{кр}-C_p$. В других случаях, когда в результате сушки происходит растрескивание кусочков (частиц) высушиваемого материала и увеличивается поверхность фазового контакта, скорость сушки возрастает и выражается на графике рис. 7.7 штриховой кривой, расположенной выше прямой $C_{кр}-C_p$.

Для практических расчетов желательно иметь сравнительно простые уравнения типа (7.22). При этом численное значение коэффициента скорости сушки K берется только из опытных данных, полученных для условий рассматриваемой задачи.

Массопередача в системах с твердой фазой. Основу расчета массообмена с твердым телом составляют уравнение переноса вещества (4.9), которое без конвективных членов и в отсутствие источников или стоков ($J_м = 0$) имеет следующий вид (уравнение Фика):

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_м \nabla^2 C, \qquad (7.23)$$

где $D_м$ – коэффициент диффузии переносимого вещества (влаги) в твердом теле или коэффициент массопроводности; ∇^2 – дифференциальный оператор Лапласа (лапласиан).

Уравнение Фика в выбранной системе координат решается с *краевыми условиями* (условиями однозначности), формулируемыми в соответствии со спецификой конкретного процесса. При этом *начальные условия* описывают распределение концентрации в начальный момент времени $\tau = 0$, а *граничные* – отражают особенности массопереноса на границе сплошной среды с твердым телом.

В самом общем плане используется следующая классификация граничных условий. В граничных условиях *первого рода* задана концентрация переносимого вещества на границе тела – постоянная или изменяющаяся во времени. В граничных условиях *второго рода* задано распределение удельного потока вещества на границе тела. В граничных условиях третьего рода задана равновесная концентрация вещества в окружающей среде $C_р$ и коэффициент массообмена β тела со средой, т. е. условие баланса переносимой массы вещества на граничной поверхности с координатой $x = \delta$:

$$-D_м \left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x=\delta} = \beta\left(C_г - C_р\right), \qquad (7.24)$$

где $C_г$ – концентрация вещества на границе твердого тела с окружающей средой.

В граничных условиях *четвертого рода* задано распределение удельных потоков вещества (либо постоянный поток вещества) на границе двух соприкасающихся тел.

Масштабные преобразования уравнения Фика и граничных условий на основании теории подобия (см. подразд. 6.1) позволяют сформулировать ряд критериев подобия в процессах массопереноса и искать решения в следующей безразмерной критериальной форме:

$$\frac{C - C_р}{C_0 - C_р} = f(\mathrm{Fo}_д,\ \mathrm{Bi}_д,\ \Gamma), \qquad (7.25)$$

где C – концентрация вещества в произвольной точке твердого материала и в произвольный момент времени $\tau > 0$; C_0 – постоянная по объему твердой фазы концентрация вещества в начальный момент времени $\tau = 0$; $\mathrm{Fo}_д$ – диффузионный критерий Фурье (в зарубежной литературе его называют критерием Фика); $\mathrm{Fo}_д = D_м\tau/l^2$ (здесь l – определяющий линейный размер твердого тела), $\mathrm{Bi}_д$ – диффузионный критерий Био; $\mathrm{Bi}_д = \beta l/D_м$; Γ – безразмерная координата.

Критерий Фурье характеризует изменение скорости потока вещества, перемещаемого массопроводностью в твердом теле; критерий Био выражает отношение пропускных способностей стадий внешнего (в пограничном слое сплошной среды) и внутреннего (в твердой фазе) массопереноса.

Если стадия внешней диффузии является существенно медленной, т. е. ее продолжительность гораздо больше по сравнению с любой другой стадией ($Bi \to 0$), то эта стадия контролирует массоперенос в целом – ее называют *лимитирующей* и говорят, что массообмен протекает в *условиях внешней задачи.* В этом случае проще прямо использовать уравнения конвективного массопереноса, не обращаясь к уравнениям Фика.

Если в качестве лимитирующей стадии выступает миграция вещества внутри твердой фазы (тогда $Bi \to \infty$), то говорят о *внутренней задаче* массопереноса.

Возможны технологические ситуации, когда условия внешнего и внутреннего массопереносов весьма благоприятны, а существенно медленной стадией является подвод вещества в рабочую зону со сплошной средой или же ее отвод из рабочей зоны с твердой фазой. Это означает, что массоперенос происходит в условиях *потоковой* задачи по одной из фаз – той, что лимитирует массоперенос в целом.

При наличии лимитирующей стадии расчет процессов массопереноса относительно прост. В отсутствие лимитирующей стадии, когда хотя бы две конкурирующие процесс стадии сопоставимы по интенсивности, расчет обычно значительно сложнее; в этом случае говорят о *смешанной* задачи массопереноса.

Далее кратко рассмотрим процессы сушки при наличии отдельных лимитирующих стадий. При этом будем считать, что подвод теплоты не лимитирует процесс, так как происходит быстрее переноса влаги. Другими словами, балансовый статический расчет тепловых и массовых потоков достаточен для осуществления сушки.

Сушка в условиях внутренней задачи. Для упрощения рассмотрим процесс сушки в единичной сферической частице (зерне) радиуса R. В начальный момент времени $\tau = 0$ концентрация влаги C (например, мольная) постоянна во всем объеме сферы и равна C_0. Сферу по всей внешней поверхности омывает поток сушильного агента с равновесной для данных условий сушки концентрацией влаги $C_р$ на значительном удалении от поверхности сферы; процесс сушки считается симметричным (рис. 7.8).

Проследим за процессом в единичном зерне при условии, что после внесения зерна в зону сушки на его поверхности мгновенно устанавливается и в ходе процесса поддерживается равновесная концентрация $C_р$ (граничное условие первого рода). Такое допущение предполагает, что в условиях внутренней задачи внешний массообмен является бесконечно интенсивным [2]. Спустя небольшой промежуток времени

τ_1 приповерхностные области зерна теряют влагу, а глубинные еще не затронуты сушкой. К моменту времени τ_2 незатронутыми остаются лишь центральные зоны зерна, в остальных влажность заметно меньше начальной. А к моменту времени τ_3 концентрация влаги меньше исходной уже во всем объеме зерна; в момент τ_4 обезвоживание зерна еще глубже: влажность понижена, она стала ближе к равновесной. Если сушка ведется долго (теоретически при $\tau \to \infty$), то влажность во всем объеме зерна стремится к равновесной $C_р$.

Задача анализа применительно к единичному зерну состоит в определении влажности в произвольной точке внутри зерна с радиальной координатой r в произвольный момент времени τ, т.е. в определении функции $C = C(r, \tau)$.

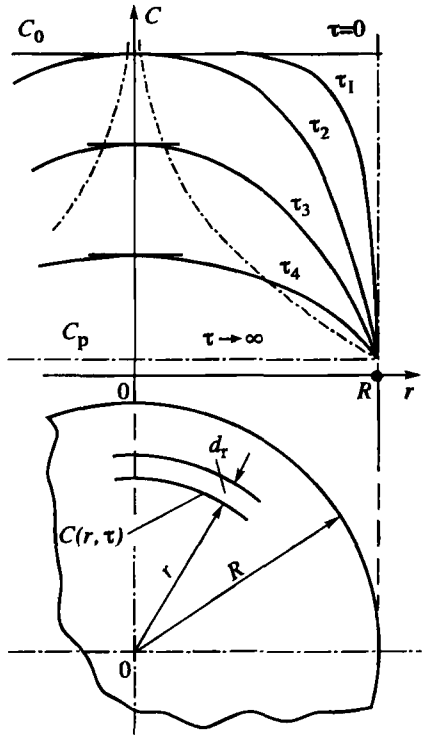


Рис. 7.8. Расчетная схема симметричной сушки сферического зерна

Для этого воспользуемся уравнением массопроводности (7.23). Для единичного сферического зерна радиусом R при симметричной сушке в случае постоянного коэффициента диффузии влаги в материале $D_м$ оно записывается в сферических координатах:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_м\left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial C}{\partial r}\right); \quad 0 \le r \le R, \quad \tau > 0. \tag{7.26}$$

Коэффициент диффузии влаги в материале $D_м$ нередко существенно зависит от ее концентрации в нем; при изменении C могут изменяться физическое состояние влаги в материале и характеристики ее диффузии. В этом случае $D_м$ нельзя считать постоянным в ходе процесса сушки (по объему зерна тоже). Тогда значительно усложняется решение уравнения (7.26); даже при достаточно простых зависимостях $D_м = D_м(C)$ решение такого нелинейного уравнения возможно, как правило, только численными методами. При этом возникает дополнительное затруднение в установлении и математическом выражении

зависимости $D_м$ от C. Поэтому в дальнейшем считаем $D_м = \text{const}$, придав ему некоторое среднее значение при изменении концентрации влаги от начальной $C_н$ до равновесной $C_р$.

Решение уравнения (7.26) должно удовлетворять начальному условию:

$$C(r, 0) = C_0; \quad 0 \le r \le R, \quad t = 0, \tag{7.27}$$

и граничным условиям:

$$\left.\frac{\partial C(r,\tau)}{\partial r}\right|_{r=0} = 0, \quad \tau \ge 0; \tag{7.28}$$

$$C(R,\tau) = C_р. \tag{7.29}$$

Решение уравнений (7.26) с учетом выражений (7.27)–(7.29) должно привести к зависимости в обобщенной форме:

$$C^* = \frac{C(r,\tau) - C_р}{C_0 - C_р} = f(\text{Fo}_д, r / R). \tag{7.30}$$

Для переноса вещества (влаги) при сушке сферического зерна зависимость (7.30) имеет конкретный вид бесконечного ряда:

$$C^* = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2\sin\left(n\pi\dfrac{r}{R}\right)}{n\pi\dfrac{r}{R}} \exp(-n^2\pi^2 \text{Fo}_д), \tag{7.31}$$

где n – индекс суммирования.

Ряд (7.31) быстро сходится при не очень малых значениях $\text{Fo}_д$, так как от слагаемого к слагаемому быстро растет величина n^2, входящая в аргумент экспоненциальной функции.

В практических расчетах процесса сушки интересует не столько *распределение концентрации* влаги по радиусу r (объему зерна), сколько *средняя влажность зерна*. Именно она входит в материальные балансы статики сушки, определяет необходимые затраты теплоты на процесс сушки и вообще устанавливается в твердом дисперсном материале при его хранении.

Средняя концентрация влаги в сферической частице (зерне) определяется как средняя интегральная величина в объеме сферы

$$\overline{C}(\tau) = \frac{3}{R^3}\int_0^R C(r,\tau) r^2 dr. \tag{7.32}$$

При этом средняя концентрация $\bar{C}(\tau)$ является функцией только времени τ. Усреднение концентрации в зерне удобно проводить в безразмерных переменных, отыскивая не $\bar{C}(\tau)$, а комплекс $\bar{C}(\tau) \equiv \equiv (\bar{C}(\tau) - C_p)/(C_0 - C_p)$. Это правомерно, поскольку $\bar{C}$ и $\bar{C}^*$ однозначно и линейно связаны между собой. Поэтому

$$\bar{C}^* = \frac{3}{R^3}\int_0^R C^*(r,\tau) r^2 dr. \qquad (7.33)$$

Из совместного решения (7.33) и (7.31) окончательно получим

$$\bar{C}^* \equiv \frac{\bar{C}(\tau) - C_p}{C_0 - C_p} \equiv \frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\exp(-n^2\pi^2 \mathrm{Fo}_д). \qquad (7.34)$$

При $\mathrm{Fo}_д \geqslant 0{,}1$ для технических расчетов вполне можно ограничиться первым членом ряда выражения (7.34) и записать:

$$\bar{C}^* = \frac{6}{\pi^2}\exp\left(-\pi^2 \mathrm{Fo}_д\right). \qquad (7.35)$$

При значениях $\mathrm{Fo}_д < 0{,}1$ второй и последующие члены ряда (7.34) становятся соизмеримыми с первым, и для расчета приходится брать большее число слагаемых; их число зависит от требуемой точности расчета. Значения $\bar{C}^*$ в зависимости от числа $\mathrm{Fo}_д$ затабулированы (см., например, [6]).

Дополнительные сведения о методах расчета нестационарного массообмена при сушке тел различной формы приведены в специальной литературе, например, в работах [7–11].

Сушка в условиях внешней задачи. Этот процесс протекает при удалении свободной и связной влаги и может происходить вблизи концентрации влаги $C_{кр}$ (см. рис. 7.7), если силы сцепления влаги с твердым материалом не очень велики, а условия ее диффузии с твердой поверхности в объем сушильного агента – неблагоприятны.

Основное уравнение внешнего массопереноса имеет вид:

$$W_\tau = \beta\rho F \Delta\bar{X}_{ср}, \qquad (7.36)$$

где W_τ – массовый поток влаги, кг/с; β – коэффициент массоотдачи, м/с; ρ – плотность сухого воздуха, кг/м^3; F – поверхность контакта, м^2; $\Delta\bar{X}_{ср}$ – движущая сила, выраженная через влагосодержание су-

шильного агента; $\Delta\bar{X}_{ср} = \dfrac{\Delta\bar{X}_н - \Delta\bar{X}_к}{2{,}31\lg\left(\Delta\bar{X}_н / \Delta\bar{X}_к\right)}$ (здесь $\Delta\bar{X}_н = (\bar{X}_{нас} - \bar{X})_н$ –

начальная разность между абсолютной влажностью насыщенного воздуха в условиях сушки и рабочей абсолютной влажностью, кг/кг сухого воздуха; $\Delta\bar{X}_к = (\bar{X}_{нас} - \bar{X})_к$ – конечная разность между абсолютной влажностью насыщенного воздуха в условиях сушки и рабочей абсолютной влажностью, кг/кг сухого воздуха.

Сопоставляя уравнения (7.21) и (7.36) нетрудно видеть, что $\beta_X = \beta\rho$.

Коэффициенты массоотдачи могут быть вычислены по уравнению

$$Nu_д = A\,Re^n\,(Pr_д)^m, \qquad (7.37)$$

где $Nu_д$ – диффузионный критерий Нуссельта (в зарубежной литературе его называют критерием Шервуда, Sh); $Nu_д \equiv \beta l / D_м$; $Pr_д$ – диффузионный критерий Прандтля (в зарубежной литературе его называют критерием Шмидта, Sc); $Pr_д \equiv \nu / D_м$.

Критерий Нуссельта $Nu_д$ характеризует соотношение между конвективной (β) и кондуктивной ($D_м$) составляющими массового потока; критерий Прандтля $Pr_д$ характеризует связь скоростного и концентрационного полей.

В случае сушки воздухом все физические константы для воздуха и водяного пара можно объединить в один постоянный множитель; при этом уравнение (7.37) примет вид [12]:

$$\beta = B(w\rho)^n. \qquad (7.38)$$

Коэффициенты B и n для уравнения (7.38) найдены опытным путем:

$$\beta_\rho = 5{,}6\cdot10^{-4}\,(w\rho)^{0,8}, \qquad (7.39)$$

$$\beta_X = 910\,(w\rho)^{0,8}, \qquad (7.40)$$

где w – линейная скорость воздуха, м/с.

Уравнение (7.40) получено для случая, когда движущая сила процесса сушки выражается влагосодержанием $\bar{X}$.

Поверхность межфазового контакта F тел правильной формы определяется из геометрических соображений.

Для тел, *беспорядочно насыпанных* на какой-либо площади f, при движении сплошной газовой среды над засыпкой (рис. 7.9, *а*) поверхность контакта F находят из модельного представления. Для этого вы-

деляют единичный элемент твердого тела (частицу, зерно) и принимают (рис. 7.9, *б*), что поверхность его контакта с потоком близка к полусфере диаметром d. Тогда поверхность контакта составляет $\pi d^2/2$, а площадь, на которую опирается эта полусфера, равна $\pi d^2/4$. Таким образом, поверхность контакта F_0 вдвое превышает площадку f_0 основания полусферического зерна. И если площадка f полностью покрыта насыпным материалом, то общая поверхность контакта $F \approx 2f$, поскольку контакту с внешней средой доступен только верхний слой зерен.

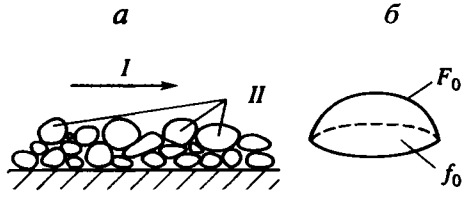


Рис. 7.9. Схема для расчета межфазового контакта при омывании сплошной средой *I* засыпки твердых частиц *II*:
а – протекание процесса; *б* – геометрические характеристики модельной полусферы

В случае движения сплошной среды *сквозь слой зерен* (неподвижный, движущийся или псевдоожиженный и т. п.) поверхность контакта определяется через удельную поверхность как $F_{уд} = 6(1 - \varepsilon)/d$ (здесь ε – порозность слоя). Очевидно, что для объема рабочей зоны V

$$F = F_{уд}V. \qquad (7.41)$$

Следует иметь в виду, что по формуле (7.41) рассчитывают *полную поверхность* дисперсных твердых тел в рабочей зоне. Реально в массообмене может принимать участие меньшая, активная часть поверхности $F_{ак} < F$. Поэтому одними из задач процесса сушки являются обеспечение возможно более полного раскрытия поверхности контакта и приближение $F_{ак}$ к F.

При теоретическом анализе процесса сушки в условиях *потоковой задачи* нет необходимости в определении кинематических характеристик внешнего массопереноса (коэффициента массообмена β, поверхности фазового контакта F и др.), а также внутреннего массопереноса (коэффициента массопроводности $D_м$ и др.). Надо быть только уверенным, что процесс ведется при достаточно высоких значениях поверхности контакта, другими словами, – при достаточно высоких пропускных способностях внешнего массопереноса, когда $\beta F\rho >> (W)$.

В этом случае по заданным характеристикам содержания влаги в твердом материале и высушиваемого агента из материальных балансов обычно отыскивают неизвестный поток влаги W, обеспечивающий заданную производительность потока высушиваемого твердого материала G.

Сушка в условиях потоковой задачи может происходить при удалении как свободной, так и связанной влаги.

Анализ процесса сушки в условиях *смешанной задачи* излагается в специальной литературе, например, в [8–10].

Расчет основных технологических параметров. Основными технологическими параметрами, определяющими процесс сушки, являются: время сушки – для аппаратов периодического действия; необходимая поверхность фазового контакта – для аппаратов непрерывного действия.

Для аппаратов периодического действия в общем случае *продолжительность сушки* или *время сушки*

$$\tau_{об} = \tau_1 + \tau_2, \tag{7.42}$$

где τ_1 и τ_2 – продолжительность сушки соответственно в первом и во втором периоде.

Значение τ_1 нетрудно определить как

$$\tau_1 = \frac{W_1}{\beta_X F \Delta \overline{X}_{ср}}, \tag{7.43}$$

где W_1 – количество удаляемой влаги при сушке, кг.

Для определения продолжительности второго периода сушки воспользуемся уравнением (7.22):

$$\frac{dC}{C - C_p} = \frac{KF}{G} d\tau, \tag{7.44}$$

где G – количество высушиваемого материала, выраженное в килограммах сухой части.

Интегрируя уравнение (7.44) применительно ко второму периоду сушки, получим:

$$\tau_2 = \frac{G}{KF} 2{,}3 \lg \frac{C_{кр} - C_p}{C_к - C_p}. \tag{7.45}$$

Для *непрерывного процесса сушки* определяют суммарную поверхность фазового контакта, необходимую для первого и второго периодов сушки:

$$F_{об} = F_1 + F_2, \tag{7.46}$$

где F_1 и F_2 – поверхности фазового контакта, необходимые для проведения соответственно первого и второго периодов сушки;

$$F_1 = \frac{W_\tau}{\beta_X \Delta \overline{X}_{ср}}, \qquad (7.47)$$

$$F_2 = \frac{G_\tau}{K} 2{,}3 \lg \frac{C_{кр} - C_р}{C_к - C_р}, \qquad (7.48)$$

где G_τ – расход сыпучего материала в единицу времени, кг/ч.

Если начальная влажность $C_н < C_{кр}$, то в уравнениях (7.45) и (7.48) $C_{кр}$ заменяют на $C_н$, а τ_1 и F_1 в расчетах принимают равными нулю.

Проведенный теоретический анализ процесса сушки позволяет определить факторы, ускоряющие процесс сушки.

С повышением температуры сушки парциальное давление водяных паров в материале увеличивается, а вместе с этим возрастает и движущая сила процесса.

С уменьшением давления в объеме, куда помещен высушиваемый материал, снижается парциальное давление водяного пара в пространстве над материалом, что также увеличивает движущую силу процесса.

С ростом скорости газового потока над высушиваемым материалом увеличивается коэффициент массоотдачи и, следовательно, повышается скорость процесса.

При измельчении и перемешивании высушиваемого материала «обновляется» поверхность фазового контакта, что приводит к уменьшению диффузионного сопротивления внутри высушиваемого материала и увеличению скорости процесса.

Таким образом, повышению скорости сушки способствуют: повышение температуры процесса; понижение давления в пространстве над высушиваемым материалом; снижение влагосодержания высушиваемого газа; повышение линейной скорости высушиваемого газа над материалом; перемешивание сыпучего материала при сушке.

Конструкции сушилок. Конструкции сушильных аппаратов (сушилок) весьма разнообразны, что связано с разнообразием высушиваемых материалов, существенно отличающихся своими физико-механическими и теплофизическими свойствами. Далее приведены отдельные типы сушилок твердых дисперсных материалов, используемых в различных составах промышленных взрывчатых материалов.

Сушилки периодического действия обычно обеспечивают сушку материалов, масштаб использования которых относительно мал.

Сушильные шкафы (рис. 7.10) являются простейшими аппаратами и представляют собой горизонтальный цилиндрический корпус *4*, в котором смонтированы греющие плиты *3*. Сверху по трубе в плиты вводится греющий пар *1*, а снизу отводится конденсат. Для более равномерного распределения пара в греющих плитах имеются перегородки

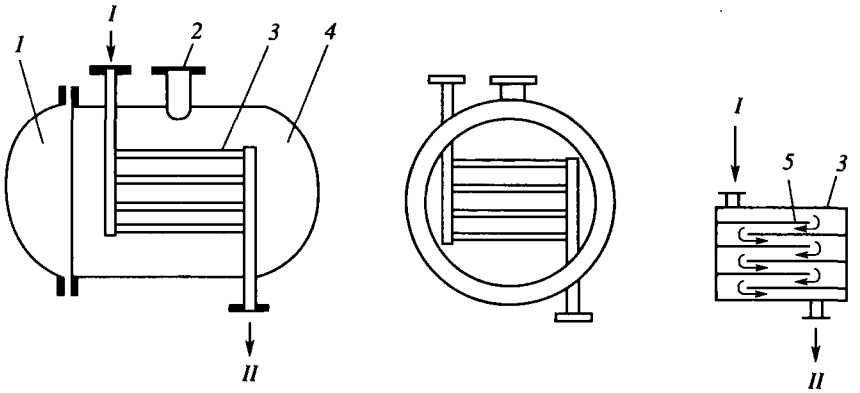


Рис. 7.10. Сушильный шкаф

5, которые одновременно обеспечивают необходимую жесткость конструкции.

Сушку обычно проводят следующим образом. От шкафа отсоединяют крышку *1* и на греющие плиты размещают высушиваемый материал, уложенный предварительно в специальные противни слоем 20–60 мм. После этого шкаф закрывают крышкой и подводят греющий пар. Образующиеся при сушке водяные пары удаляются через патрубок *2* либо в атмосферу, либо в вакуум-конденсационную систему. По окончании сушки материал выгружают из шкафа вместе с противнями.

В *камерных (полочных) сушилках* (рис.7.11) материал размещают на полках *2*, помещенных в камерах *4*. Ниже и выше полок расположены воздушные короба *1*: по нижнему подается горячий сушильный агент *I*, по верхнему отводится сушильный агент *II* с парами влаги, выделившимися из твердого материала. Равномерное распределение сушиль-

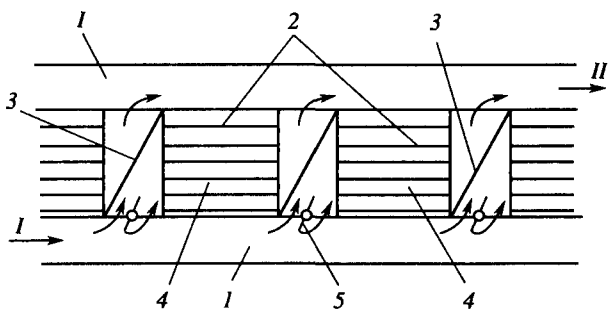


Рис. 7.11. Камерная сушилка

ного агента между полками в камере обеспечивается косыми перегородками *3*, выравнивающими гидравлическое сопротивление движению сушильного агента. Распределение потока сушильного агента между камерами обеспечивается поворотными заслонками *5*.

Достоинство полочной сушки и сушки в шкафах – простота конструкции и эксплуатации. Среди недостатков: периодичность действия и как следствие, – невысокая производительность, в частности из-за затрат времени на извлечение полок из камер или противней из шкафа, выгрузку высушенного материла и загрузку новых порций влажного, возврат полок в камеру или противней в шкаф. Следует также отметить неравномерность сушки: лучше высушиваются области твердого материала (зерна, слои и т. д.), непосредственно соприкасающиеся с сушильным агентом, хуже – внутренние зоны твердого материала, например, зерна в глубине засыпки, не контактирующие или плохо контактирующие с потоком сушильного агента. Это ухудшает качество продукта либо заставляет увеличивать продолжительность сушки.

Сушилки с мешалками (рис. 7.12) являются более сложными аппаратами. Обычно они имеют горизонтальный цилиндрический корпус *4*, внутри которого находится гребковая мешалка *3*. Аппарат снабжается загрузочным люком *1*, разгрузочным люком *6* и паровой рубашкой *5*. Патрубок *2* служит для отвода образующихся при сушке паров либо в атмосферу, либо в вакуум-конденсационную систему. Высушиваемый материал заполняет обычно 0,2–0,3 общего объема аппарата.

Гребки мешалки расположены под углом к оси аппарата и могут вращаться в различном направлении. Благодаря этому материал перемещается слева направо либо справа налево. В процессе сушки, а также выгрузки высушенного материала из аппарата направление вращения мешалки периодически изменяют.

Сушилки с мешалками выгодно отличает то, что процесс сушки в них благодаря перемешиванию материала протекает с большой скоро-

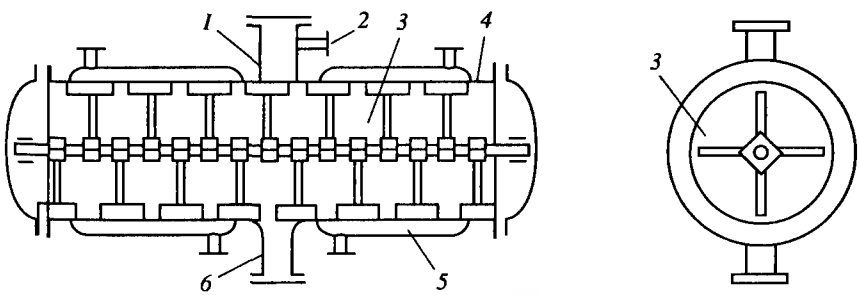


Рис. 7.12. Сушилка с мешалками

стью и, кроме того, высушенный материал выгружается из аппарата механизированным способом. Эта сушилка также периодического действия.

Производительность сушилок с мешалками определяют по площади поверхности нагрева, исходя из средней напряженности поверхности нагрева по влаге, испаренной за время одной операции.

Техническая характеристика сушилки

Длина, м	6
Диаметр, м	1
Частота вращения мешалки, $мин^{-1}$	1,5–6

Сушилками непрерывного действия являются барабанные и трубчатые сушилки.

Барабанные сушилки (рис. 7.13) применяют для сушки различных сыпучих материалов, например, аммиачной селитры. Основным узлом этих сушилок является полый горизонтальный барабан *5*, установленный под небольшим углом α к горизонту. Барабан снабжен бандажами *3*, каждый из которых катится по двум опорным роликам *10* и фиксируется упорными роликами *9*. Барабан приводится во вращение от привода с помощью насаженного на барабан зубчатого колеса *4*. Влажный материал вводится в барабан через течку *2* (или шнек). При вращении барабана высушиваемый материал пересыпается в емкость *8* и движется к разгрузочному отверстию. За время пребывания мате-

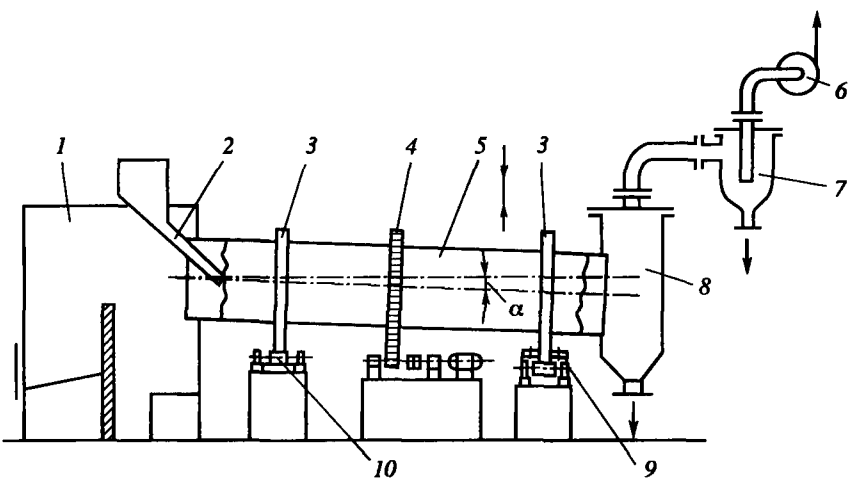


Рис. 7.13. Барабанная сушилка

риала в барабане происходит его высушивание при взаимодействии с газовым теплоносителем. Обычно теплоносителем являются топочные газы, которые поступают в барабан из печи *1*, или воздух, подогретый в калорифере.

Для более равномерного распределения материала и улучшения соприкосновения его с газом в барабане монтируют распределительные насадки. Сушильный агент (газ или воздух) может двигаться по отношению к высушиваемому материалу прямотоком или противотоком. Отработанные газы отсасываются вентилятором *6* через циклон *7*. У торцов барабана имеются уплотняющие устройства, препятствующие подсосу воздуха в сушилку. При этом подача и отсос сушильного агента должны быть отрегулированы таким образом, чтобы в сушильном барабане поддерживалось постоянное разрежение. Это дает возможность при сушке аммиачной селитры избежать пыления и ускорить сушку на 10–15%.

Техническая характеристика барабанной сушилки

Диаметр, м	1,2
Длина, м	6,0–7,5
Угол наклона α, град	2–3
Частота вращения барабана, $мин^{-1}$	2–5
Производительность, т/ч	1,0–1,5

Важной характеристикой барабанных сушилок является напряжение объема барабана по влаге, т. е. количество влаги, испаряемой за 1 ч в 1 $м^3$ объема барабана. При сушке аммиачной селитры с начальной влажностью 3–5% до конечной влажности 0,2–0, 5% при температуре воздуха 100–120 °С на входе в барабан и около 60 °С на выходе из барабана напряжение по влаге составляет 4–6 $кг/(м^3 \cdot ч)$.

Из *трубчатых сушилок* (рис. 7.14) наиболее распространенной является сушилка, в которой поверхностью нагрева служит пучок обогреваемых паром труб, вращающихся внутри цилиндрического корпуса, заполненного высушиваемым материалом. Влажный материал поступает в корпус сушилки *2*. Внутри корпуса на цапфах *4* вращается пучок труб *5*, собранных торцами в коллекторные коробки. В коробке *3* пар через цапфу распределяется по трубам и уходит из труб в коробку *1* и цапфу в конденсационное устройство. Материал движется от зоны поступления по длине сушилки, все време пересыпаясь по поверхности труб. В высушенном виде он выходит через разгрузочный люк *6*. В сушилку подается подогретый в калорифере воздух (в ряде случаев воздух подается без подогрева); насыщенный парами влаги он удаляется из сушилки вентилятором. Частота вращения труб составляет 2–8 $мин^{-1}$.

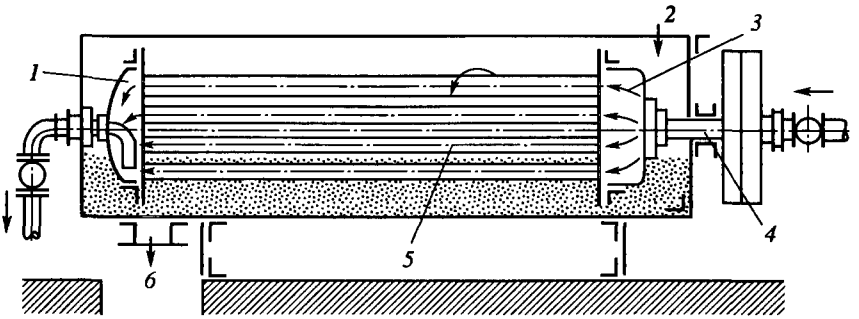


Рис. 7.14. Трубчатая сушилка

Трубчатые сушилки имеют меньшие габариты и обладают по сравнению с барабанными сушилками большей производительностью.

Ленточные сушилки (рис. 7.15) устроены следующим образом. В сушильной камере *4* находится транспортирующее устройство, состоящее из двух барабанов *5* и ленты *7*. Исходный влажный материал (*I*) из бункера *3* питателем *2* подается на ленту, на которой перемещается вдоль камеры *4*. В сушильной камере расположены пластины *1* и *6*, направляющие твердый материал на ленту и сушильный агент *III* в пространство над лентой. По отношению к материалу воздух может двигаться прямотоком, противотоком *II*, поперек движения ленты или же направляться через слой лежащего на ленте материала; в последнем случае лета выполняется перфорированной. Высушенный материал *IV* через питатель *2* выходит из сушилки.

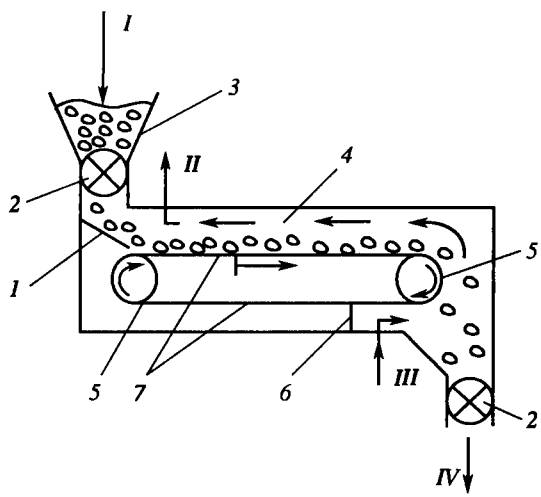


Рис. 7.15. Ленточная сушилка

Ленточные сушилки работают непрерывно, их производительность достаточно высока.

В *многоярусных ленточных сушилках* (рис. 7.16) влажный материал через загрузочный бункер *1* поступает на верхний ленточный транспортер *3*, на котором перемещается вдоль камеры *2*, и затем пересыпается на ленточный транспортер второго яруса и т. д. С транспортера нижнего яруса высушенный материал поступает в разгрузочный бункер *6*.

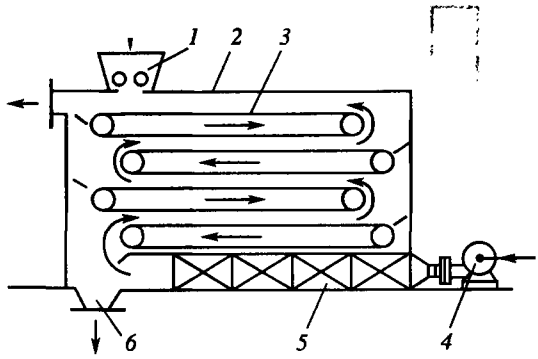


Рис. 7.16. Многоярусная сушилка

Пересыпание материала с ленты на ленту способствует его перемешиванию, что также увеличивает скорость сушки. Воздух нагнетается вентилятором *4*, проходит через калориферы *5* и направляется в сушильную камеру.

Пневматические сушилки (рис. 7.17) используют обычно для высушивания сыпучих материалов, обладающих незначительной начальной влажностью. Высушиваемый материал с помощью питателя *6* непрерывно направляется в сушильную пневмотранспортную трубу *3*. В эту же трубу вентилятором *8* нагнетается воздух, нагреваемый до требуемой температуры в калорифере *7*.

Количество воздуха, расходуемого на сушку, определяется либо уравнением (7.20), либо условиями пневмотранспорта твердых частиц [4].

На основе практических данных принимают, что 1 кг воздуха перемещает по пневмотранспортной трубе 5–25 кг высушиваемого материала, находящегося во взвешенном состоянии.

Линейную скорость движения высушиваемых твердых частиц $w_т$ ориентировочно рассчитывают как скорость воздушного потока $w_в$, уменьшенную на скорость осаждения $w_о$, т. е. $w_т = w_в - w_о$.

По скорости $w_т$ и продолжительности сушки τ, определяемой по уравнениям (7.43) и (7.45), находят высоту рабочей части аппарата

$$h_р = w_д \tau.$$

Из сушильной пневмотранспортной трубы высушенный материал и воздух поступают в сборник-амортизатор *1*. Высушенный материал отделяется от воздушного потока в циклоне *4*. Из циклона воздух на-

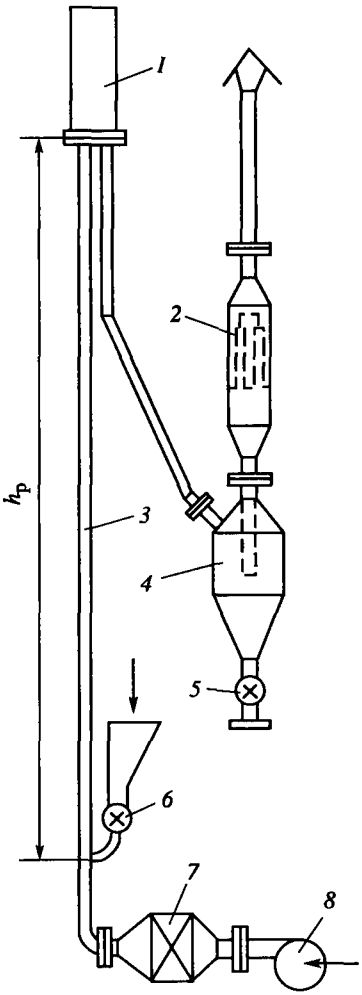


Рис. 7.17. Пневматическая сушилка

правляется через рукавный фильтр *2* в атмосферу. Высушенный материал собирается в конической части циклона и выгружается через затвор-отводчик *5*.

Сушилки с псевдоожиженным слоем (рис. 7.18) представляют собой прямоугольную камеру *4* с находящейся над ней расширенной сепарационной зоной *3*. Исходный твердый материал *I* из бункера *2* подается питателем 1 на псевдоожиженный слой. Сушильный агент *IV* поступает из коллектора *8* через распределительные камеры *7* и перфорированную решетку *10*; его подачу регулируют по зонам с помощью поворотных заслонок *9*. Из аппарата отработанный сушильный агент *II* отводится к пылеулавливающим устройствам. Материал в псевдоожиженном состоянии перемещается к выходу зигзагообразно через противоположные зазоры, образованные вертикальными перегородками со стенками камеры; в некоторых конструкциях псевдоожиженный материал «переливается» через пороги *5* и по коробу *6* (*III*) отводится в приемный бункер.

Сушка в псевдоожиженном состоянии является одним из эффективных средств интенсификации этого процесса, так как каждая частица имеет контакт с сушильной средой. Сушилки этого типа нашли широкое применение при сушке твердых окислителей – хлоридов и перхлоратов [14].

В *вибрационных сушилках* (рис. 7.19) ожижение твердых дисперсных частиц осуществляется за счет механического вибрирования слоя и частично за счет продувания сушильного агента. Горячий сушильный агент *I* через распределительную коробку *6* и перфорированную газо-

распределительную решетку *2* поступает в сушильную камеру *1* аппарата, в который исходный влажный материал *III* транспортируется в виде тонкого слоя вдоль решетки *2* и в высушенном состоянии выводится (*IV*) из камеры. Горячий воздух (сушильный агент) подается в сушильную камеру в количестве, недостаточном для псевдоожижения, что позволяет существенно уменьшить унос пыли с воздухом *III*. Дополнительная (недостающая) энергия для псевдоожижения твердого материала подводится к слою за счет механических колебаний от вибратора *5*. Система пружин-амортизаторов *4* соединяет сушильную камеру *1* с неподвижным основанием *3*.

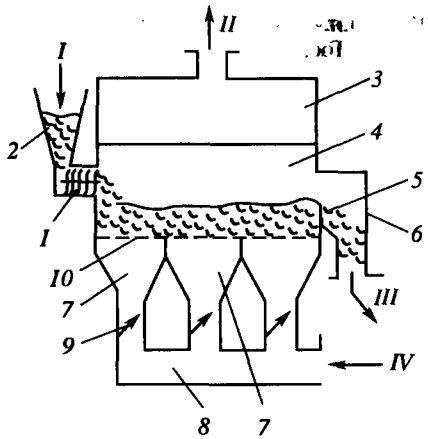


Рис. 7.18. Сушилка с псевдоожиженным слоем

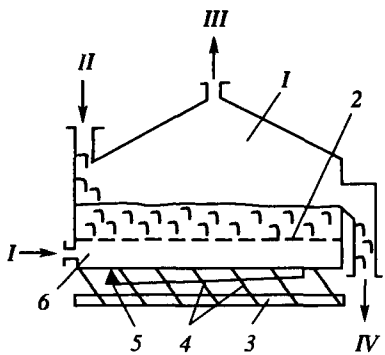


Рис. 7.19. Вибросушилка

Виброожижению могут быть подвержены многие твердые дисперсные материалы, плохо ожижаемые классическими способами псевдоожижения. Это относится, например, к материалам с пластинчатой, игольчатой и некоторой другой формой дисперсных частиц. Механическое воздействие на слой способствует разрушению каналов и застойных зон, препятствует комкованию твердых материалов. Все это расширяет возможный диапазон использования вибрационных сушилок.

Дополнительные сведения о конструкциях сушилок и методов их расчета можно найти в работах [2, 10, 12, 13, 17].

Литература

1. Перечень взрывчатых материалов, оборудования и приборов взрывного дела, допущенных к применению в Российской Федерации. Сер. 13. Вып.

2/Колл. авт. – М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 80 с.

2. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учеб. для вузов: В 2 книгах. Кн.2/Под ред. проф. В.Г. Айнштейна. – М.: Химия, 2000. – 1760 с.

3. *Гельперин Н.И., Носов Г.А.* Основы техники кристаллизации расплавов. – М.: Химия, 1975. – 352 с.

4. *Генералов М.Б.* Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: Учеб. пособ. для вузов. – Калуга: Изд-во Н. Бочковой, 2002. – 592 с.

5. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968. – 720 с.

6. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

7. *Лыков А.В.* Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1970. – 430 с.

8. *Муштаев В.И., Тимонин А.С., Лебедев В.Я.* Конструирование и расчет аппаратов со взвешенным слоем. – М.: Химия, 1991. – 344 с.

9. *Рудобашта С.П.* Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980. – 248 с.

10. *Романков П.Г., Фролов В.Ф.* Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой). – Л.: Химия, 1990. – 384 с.

11. *Сажин Б.С., Сажин В.Б.* Научные основы техники сушки. – М.: Наука, 1977. – 448 с.

12. *Плановский А.Н., Николаев П.И.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии: Учеб. ля вузов. – М.: Химия, 1987. – 496 с.

13. *Плановский А.Н., Муштаев В.И., Ульянов В.М.* Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. – М.: Химия, 1979. – 288 с.

14. *Фиошина М.А., Русин Д.Л.* Основы химии и технологии порохов и твердых ракетных топлив: Учеб. пособие/РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М., 2001. – 316 с.

15. Взрывчатые вещества и пороха/Бутников М.А., Левкович Н.А., Быстров И.В. и др. – М.: Гос. изд. оборонной литер., 1955. – 363 с.

16. *Карташов Э.М.* Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: Учеб. пособ. для вузов. – М.: Высшая школа, 2001. – 549 с.

17. *Ворошилов А.П., Муштаев В.И.* Аппараты с устойчивыми вибропсевдоожиженными слоями. – Сумы: изд-во «Корпункт», 2002. – 190 с.

ГЛАВА 8

ПРОЦЕССЫ КОМПАКТИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД ДАВЛЕНИЕМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

8.1. Прессование промышленных взрывчатых веществ [1–6]

Общие сведения. При изготовлении монолитных изделий из сыпучих и пластичных композиционных ПВВ заданные геометрические формы и размеры достигаются за счет воздействия внешнего давления. Происходящие при этом процессы уплотнения и упрочнения *(компактирования)* в структуре перерабатываемого материала определяются его напряженно-деформированным состоянием, реологическими и физико-механическими свойствами.

К процессам компактирования давлением обычно относят: прессование, шнекование и виброуплотнения твердых дисперсных сред; экструзию (продавливание через формующие насадки) полимерных композиций.

При изготовлении разнообразных средств взрывания из порошкообразных ПВВ (шашек-детонаторов типов Т-400Г, ПТ-200 и ПТ-400; источников сейсмических волн ИС-100; детонаторов промежуточных модульных типов ДПМ-250, ДПМ-350 и др.) широко используются способы прессования [1, 2].

Прессованная тротиловая шашка-детонатор Т-400Г представляет собой цилиндрическое изделие диаметром 70 мм, высотой 71 мм с центральным каналом диаметром 14,5 мм и массой 400 г. Цилиндрический канал служит для размещения пучка из четырех нитей детонирующего шнура (ДШ) с целями усиления его инициирующей способности и полной гарантии безотказного взрывания зарядов ВВ [1].

Прессованные тротиловые шашки-детонаторы ПТ-200 и ПТ-400 представляют собой прямоугольные изделия длиной 101 мм, шириной 51 мм, высотой 27 и 52 мм и массой 200 и 400 г (соответственно). Шашки выпускаются с гнездом под электрический детонатор (ЭД) диаметром 8 мм и глубиной 37 мм и без гнезда. Инициирование шашек без гнезда осуществляют с помощью 3–4 витков ДШ, намотанных на боковой поверхности шашек.

Необходимая конфигурация, плотность и прочность изделий достигаются вследствие силового воздействия на перерабатываемый ма-

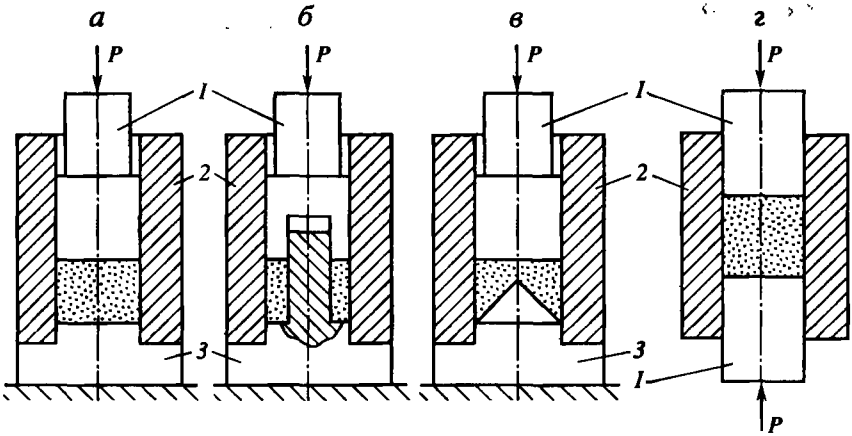


Рис. 8.1. Схемы одностороннего (*а–в*) и двухстороннего (*г*) прессования: *1* – пуансон; *2* – матрица; *3* – поддон; *P*-усилие, прикладываемое к пуансону

териал, находящийся в замкнутом объеме пресс-инструмента. Прессование проводят на высокопроизводительных роторных автоматических и обычных полуавтоматических прессах, установленных в прочных железобетонных кабинах. Поскольку операция прессования не безопасна (возможен случайный взрыв), она проводится в отсутствие людей.

Пресс-инструмент для данной операции изготовляется в виде матрицы с поддоном и пуансоном из закаленной стали (рис. 8.1). Поддон может иметь стержень (иглу) для образования центрального сквозного канала у цилиндрических шашек и гнезда на одной из плоскостей у плоских шашек прямоугольной формы.

Технологический процесс изготовления шашек состоит из следующих фаз:

- механического просеивания чешуек тротила для удаления комков и посторонних примесей;
- объемного дозирования навесок для прессования с механизированной подачей их в кабину и засыпкой в матрицу пресс-инструмента;
- прессования;
- выталкивания шашек из пресс-инструмента и транспортирования их из кабины;
- внешнего осмотра и отбраковки шашек с недопустимыми дефектами;
- механического заворачивания шашек в бумагу с последующей ее гидроизоляцией парафиновой мастикой;
- упаковки готовых шашек в картонные ящики.

Заданную плотность шашек при прессовании (в пределах 1500–1590 кг/м^3) обеспечивают соблюдением массы навески ВВ и режимом давления прессования с применением механических ограничителей движения пуансона. Бумажная обертка необходима для уменьшения боя при транспортировании и применении, а гидроизоляция способствует повышению водостойкости.

При прессовании в замкнутой матрице происходит изменение формы и размеров дисперсного тела за счет уменьшения объема пор и деформирования частиц материала.

Способность порошкообразных материалов увеличивать свою плотность при действии давления и образовывать брикеты, таблетки заданной формы и размеров называется *прессуемостью*. Прессуемость порошкообразных материалов определяется двумя основными технологическими характеристиками – уплотняемостью и формуемостью.

Уплотняемость – это способность пористого тела изменять свою плотность под действием силы давления прессования. Эта количественная технологическая характеристика определяется зависимостью плотности от давления прессования.

Способность пористого тела сохранять заданную форму при определенном значении плотности называется *формуемостью*.

Эти технологические характеристики порошкового тела с учетом размеров и конфигураций готовых изделий, физико-химических и механических свойств его структурных элементов – частиц, должны учитываться при выборе способа прессования.

Одностороннее прессование порошков в простейшем случае осуществляется в пресс-инструменте (см. рис. 8.1, *а–в*), включающем пуансон *1*, матрицу *2* и поддон *3*. Наиболее часто прессованием получают сплошные цилиндрические изделия. В этом случае прессование ведется в цилиндрической матрице; пуансон и поддон имеют плоские торцы (см. рис. 8.1, *а*). При получении изделий с центральным каналом поддон или пуансон имеют иглу (см. рис. 8.1, *б*). При прессовании изделий с центральной воронкой пуансон и поддон имеют выступ, соответствующий очертанию воронки (см. рис. 8.1, *в*).

Процесс прессования осуществляется в определенной последовательности. Порцию порошка, величина которой определяется заданными размерами изделия и его плотностью, засыпают в матрицу, установленную на поддон. Затем в матрицу вставляют пуансон, к верхнему торцу которого с помощью пресса прикладывается определенное усилие *P*. После снятия усилия спрессованное изделие удаляют из матрицы.

По способу удаления спрессованных изделий конструкции пресс-инструментов разделяют на два типа: цельнокорпусный с выпрессовкой изделия из матрицы после прессования; секционный, из которого

изделие извлекается в результате разборки пресс-инструмента. При использовании цельнокорпусного пресс-инструмента после прессования изделие выталкивается из матрицы пуансоном или специальным выталкивателем. В некоторых конструкциях пресс-инструмента поддон используют для выталкивания изделия.

В процессе прессования между порошком и стенками матрицы (в случае прессования канальных изделий и стенками иглы) возникают силы трения, которые приводят к перепаду давления по высоте изделия. Особенно наглядно это проявляется при прессовании относительно высоких изделий по отношению к поперечному размеру. Наибольшее давление наблюдается непосредственно вблизи торца пуансона, и ее величина снижается по мере удаления от пуансона. В результате прессованные изделия имеют различную плотность по высоте: максимальную у поверхности торца пуансона и минимальную на противоположном торце поддона. По мере увеличения высоты, например, цилиндрического изделия, по сравнению с диаметром изменение плотности материала по объему изделия увеличивается.

Для прессования изделий с более равномерным распределением плотности применяют пресс-инструмент с двумя подвижными пуансонами.

Двустороннее прессование осуществляется в пресс-инструменте с неподвижной матрицей (рис. 8.1, *г*). При прессовании в неподвижной матрице усилие P со стороны пресса одновременно прикладывается к двум пуансонам, которые перемещаются навстречу друг другу. В результате более равномерно распределяется плотность по объему изделия – максимальная на торцах и меньшая в центре изделия.

При двустороннем прессовании можно считать, что прессовка в среднем сечении разделена по высоте некоторой условной нейтральной плоскостью. Частицы материала, находящиеся в нейтральном слое, остаются неподвижными относительно матрицы. Со стороны же торцов частицы порошкообразного материала под действием пуансонов перемещаются в сторону нейтрального слоя.

При использовании пресс-инструмента с «плавающей» матрицей (рис. 8.2) преждевременному опусканию матрицы *2* относительно нижнего пуансона *4* препятствует демпфирующая пружина *5*, уравновешивающая массы матрицы, верхнего пуансона *1* и навески порошка *3*. При приложении усилия к верхнему пуансону начинается одновременное перемещение обоих пуансонов относительно матрицы.

Механизм компактирования давлением сыпучих материалов. В исходном насыпном состоянии у сыпучих тел между частицами, главным образом, действуют силы механического зацепления, а действие связей, определяемых межмолекулярным взаимодействием, часто вообще отсутствует.

В процессе механического уплотнения под действием давления наблюдается несколько стадий образования связей между частицами.

На первой, начальной, стадии уплотнения в основном происходят структурные деформации, связанные с ликвидацией пустот и переходом частиц в плотную упаковку. С ростом нагрузки доля структурных деформаций уменьшается, начинают преобладать сдвиговые деформации, сопровождающиеся изменением формы, разрушением частиц и окружающих их оксидных и других пленок. В результате деформации твердых частиц увеличивается число взаимных контактов в поверхностном слое и создаются благоприятные условия для межмолекулярного взаимодействия структурных элементов на последующих стадиях. Обычно на этой стадии сыпучий материал не успевает сформоваться в связное пористое тело, и после снятия нагрузки вновь превращается в несвязное сыпучее состояние. Если технологический процесс необходимо заканчивать на этой стадии, то для получения монолитного пористого изделия в исходный материал надо вносить связующие добавки.

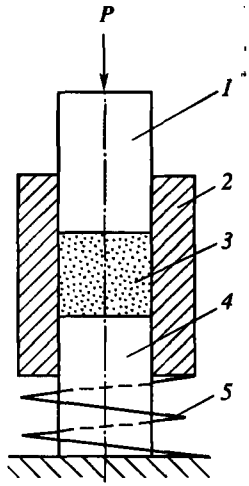


Рис. 8.2. Схема прессования с «плавающей» матрицей

На второй стадии при дальнейшем повышении нагрузки (давления) происходит упругопластическое сжатие пористого агломерата. Контактные поверхности сближаются до расстояния, не превышающего радиуса действия межмолекулярных сил, в результате чего образуются отдельные мостики (микроучастки) диффузионного типа.

Давление, необходимое для образования мостиков спайки между частицами, в значительной степени зависит от пластических свойств твердых компонентов сыпучего материала. Чем ниже предел текучести материала частиц, тем меньше давление, при котором формируются контакты между отдельными частицами.

На контактных поверхностях частиц при пластических деформациях возможно спекание частиц, и для веществ с относительно низкой температурой плавления образование поверхностных пленок расплава. Последующее отверждение расплава обеспечивает появление контактов между частицами за счет образования связей (мостиков кристаллизационного типа). Если пластические деформации у материалов проявляются слабо, что характерно для твердых и хрупких частиц, то, как правило, прочность уплотненных агломератов незначительная. В этом случае в состав сыпучей смеси вводят связующие вещества.

В конце этой стадии уплотняемый материал достигает плотности, при которой происходит почти полное фиксирование межчастичных контактов.

На третьей стадии в результате фиксирования контактов происходит, как правило, резкое возрастание давления по сравнению с предыдущей стадией прессования при незначительном увеличении плотности пористого тела. На этом этапе происходит интенсивное развитие мостиков спайки между частицами и увеличение поверхности образовавшихся контактов. Расширение уже возникших мостиков диффузионной спайки связано с пластической деформацией, которая распространяется в глубь объема отдельных частиц. В результате пористое тело приобретает возможные для такой структуры конкретного материла наибольшие прочностные характеристики.

Следует отметить, что разбивка процесса деформирования сыпучего материала давлением на три стадии носит условный характер, так как строгих границ между ними по вполне понятным причинам установлено быть не может.

Исследования по компактированию энергонасыщенных порошкообразных материалов показали, что их прессуемость зависит не только от свойств самого вещества, но и от его состояния. Так, мелкокристаллические взрывчатые вещества прессуются труднее, чем крупнокристаллические, а пылеобразные при обычных давлениях вообще почти не прессуются. Поскольку взрывчатые вещества представляют собой смесь кристаллов различной величины, то на практике для облегчения прессования обычно отсеивают пылеобразную часть вещества.

Флегматизаторы, вводимые в небольших количествах во взрывчатые вещества, не только снижают их чувствительность к механическим воздействиям, но, увеличивая сцепление отдельных частиц, способствуют и лучшей прессуемости.

На процесс упрочнения пористых тел при компактировании давлением существенное влияние оказывает температура. При повышении температуры перерабатываемого материала, как вследствие предварительного нагрева, так и за счет диссипативного тепла, выделяющегося при механической работе деформирования, большое значение приобретают диффузионные процессы. Одновременно улучшаются пластические характеристики материала частиц. Так, прессуемость взрывчатых веществ (например, тротила) заметно улучшается при предварительном подогреве до температуры 50...60 °С.

В этих условиях следует учитывать интенсивное развитие мостиков спекания (схватывания). При спекании частиц без значительной их пластической деформации диффузионные процессы приобретают решающее значение.

В ряде случаев рекристаллизация сопровождает процесс спекания частиц. Однако, учитывая, что рекристаллизация не является необхо-

димым условием для упрочнения и развития связей между частицами любого вещества, механизм рекристаллизации можно считать вспомогательным, завершающим процессы упрочнения связей между частицами.

Таким образом, увеличение числа мостиков спайки между частицами при развитии пластических деформаций и их развитие в результате диффузионного взаимодействия можно рассматривать как основные механизмы образования монолитного пористого тела при действии внешнего давления на первоначально сыпучий материал.

Расчет напряжений при прессовании в замкнутой матрице. Одной из основных задач любого способа прессования изделий из сыпучих материалов является достижение плотности, которая при отсутствии трещин, расслоений и сколов определяет как механическую прочность, так и необходимые специальные и эксплуатационные свойства готовых изделий. Поэтому вопросу установления зависимости между силовыми параметрами и плотностью материала при различных способах силового формования уделяется большое внимание.

Зависимость между плотностью и давлением прессования называют *кривой прессования*. Эта зависимость может быть выражена аналитически и графически. В начале рассмотрим графические методы изображения кривых прессования. Различают два вида кривых прессования – истинную и технологическую. Под истинной кривой прессования понимается графическая зависимость между давлением прессования (усилие прессования, деленное на прессующую площадь пуансона) и плотностью брикета, находящегося в матрице под давлением; под технологической – графическая зависимость между давлением прессования и плотностью брикета, извлеченного из матрицы. В последнем случае объем брикета отличается на величину упругого объемного расширения. Таким образом, для одного и того же значения давления прессования плотность брикета, замеренная по истинной кривой прессования, будет несколько больше, чем замеренная по технологической кривой прессования. Правда, эта разница в плотностях брикета будет незначительной и обычно не превышает 1–2%.

На практике наиболее часто пользуются технологической кривой прессования. Достаточно часто технологические кривые прессования, приводимые в литературе, получены без учета потерь давления на внешнее контактное трение прессуемого материала на боковой поверхности матрицы. В этом случае кривые прессования одного и того же материала, но при разном соотношении высоты и диаметра изделия могут существенно различаться между собой, так как доля потерь на трение в каждом случае была различной. Это создает трудности при переносе данных лабораторных исследований на натурные изделия или при сопоставлении практических данных разных исследователей.

Значительные преимущества имеет метод построения кривых прессования в «чистом виде», когда влияние внешнего трения исклю-

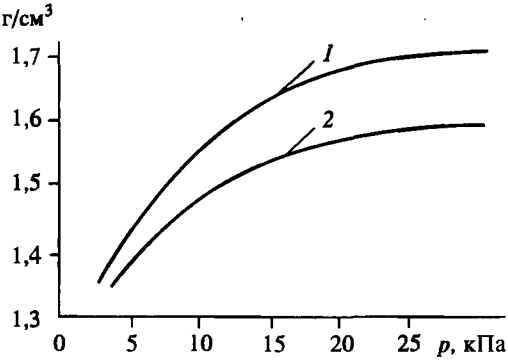


Рис. 8.3. Технологические кривые прессования пикриновой кислоты *1* и тринитротолуола *2* при 20 °С

чено. Это влияние при проведении опытов можно снизить прессованием материала в тонком слое и смазыванием внутренней поверхности матрицы антифрикционными материалами.

На рис. 8.3 изображены технологические кривые прессования в координатах «плотность–давление прессования» порошка пикриновой кислоты и чешуированного тротила при 20 °С. Для исключения влияния сил внешнего трения эксперименты проводились при прессовании цилиндрических брикетов относительно малой высоты H, когда $H/D = 0{,}25 \div 0{,}50$ (здесь D – диаметр брикета). При таком отношении H/D потери усилия прессования на трение не превышают порядка 5%, и с такой точностью можно считать, что давление прессования p и плотность ρ распределены по объему изделия равномерно.

Как видно из приведенных на рис. 8.3 данных, вначале с ростом давления прессования происходит интенсивное увеличение плотности материала. Затем плотность увеличивается менее интенсивно. При дальнейшем росте давления плотность приближается к постоянной величине, равной плотности пористого монолитного материала.

Зависимость между давлением прессования и плотностью материала может быть выражена в виде математического выражения, которое получило название *уравнение прессования.*

Уравнения прессования получены различными авторами путем математической обработки экспериментальных зависимостей или выведены аналитически на основе принятых физических предпосылок [4].

В последнем случае роль эксперимента сводится к определению постоянных величин, входящих в уравнение, а также к проверке их применимости и тем самым к подтверждению принятых предпосылок.

Для расчета плотности материала в зависимости от давления прессования было предложено несколько эмпирических и полуанали-

тических уравнений. Широкое применение получило полуэмпирическое уравнение прессования, предложенное Н.Ф. Куниным и Б.Д. Юрченко:

$$\rho = \rho_{пр} - k_{нп}\exp(-\alpha_{пс}p_{п}), \qquad (8.1)$$

где $\rho_{пр}$ – условная предельная плотность, г/см^3; $k_{нп}$ – начальный параметр прессования, г/см^3; $\alpha_{пс}$ – коэффициент потери сжимаемости, см^2/кг; $p_{п}$ – давление прессования, кг/см^2.

Входящие в уравнение (8.1) три постоянных показателя: $\rho_{пр}$, $k_{нп}$, $\alpha_{пс}$ определяются из экспериментальной кривой прессования. Их значения для порошкообразных смесевых и индивидуальных взрывчатых веществ при различной температуре приведены в табл. 8.1

Распределение напряжений и плотности в брикетах при одностороннем прессовании определяется следующим образом. При прессовании порошкообразного материала в замкнутой матрице, как уже указывалось выше, из-за внешнего контактного трения давление в брикете снижается от пуансона к поддону. В прессуемом материале возникают не только продольные силы, являющиеся результатом воздействия усилия со стороны пуансона, но также радиальные и кольцевые силы вследствие ограничения перемещения материала со стороны внутренней поверхности матрицы, заклинивания между соседними частицами, а также образующихся сводов и арочных эффектов. В результате трения частиц между собой, возникновения сил, препятствующих перемещению отдельных частиц, на боковую поверхность матрицы передается давление меньше, чем в направлении осевого сжатия.

Таким образом, напряженно-деформационное состояние материала при прессовании в матрице является довольно сложным. При решении задачи распределения напряжений по высоте порошкового тела при его прессовании в замкнутой матрице обычно выдвигают предположение, что напряжения и плотность в поперечном сечении остаются постоянными (*гипотеза плоских сечений).* Согласно этой гипотезе, мысленно проведенные в прессуемом порошкообразном материале

Таблица 8.1

Значение параметров уравнении прессования

Материал	Температура, °С	$\rho_{пр}$, г/ см^3	$k_{нп}$·	$\alpha_{пс}\cdot 10^4$
Аммотол 80/20	20	1, 666	0, 40	13, 05
	50	1, 692	0, 40	13, 05
	70	1, 706	0, 39	13, 05
Тринитротолуол	20	1, 614	0, 26	15, 35
	50	1, 626	0, 23	15, 35
	70	1, 635	0, 21	15, 35

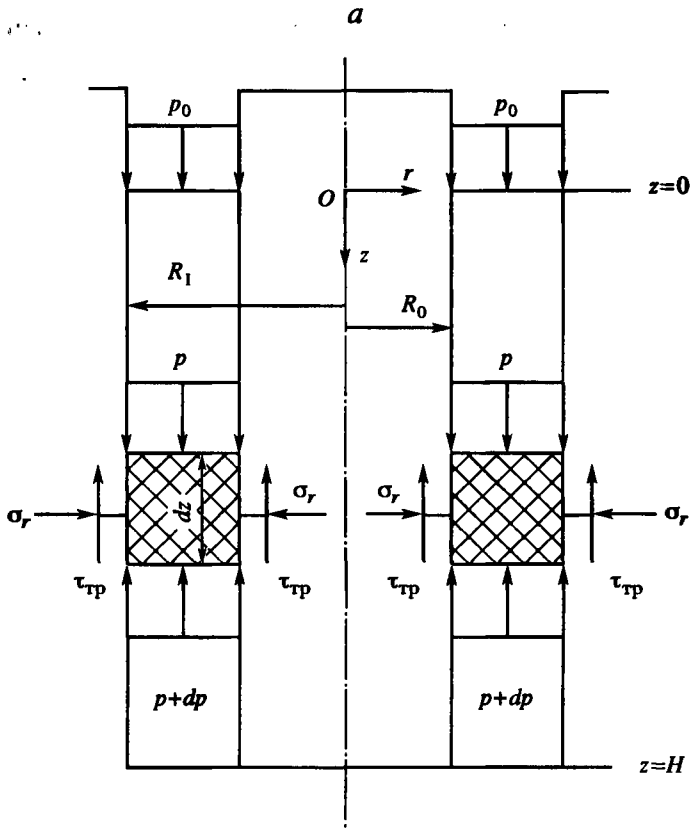


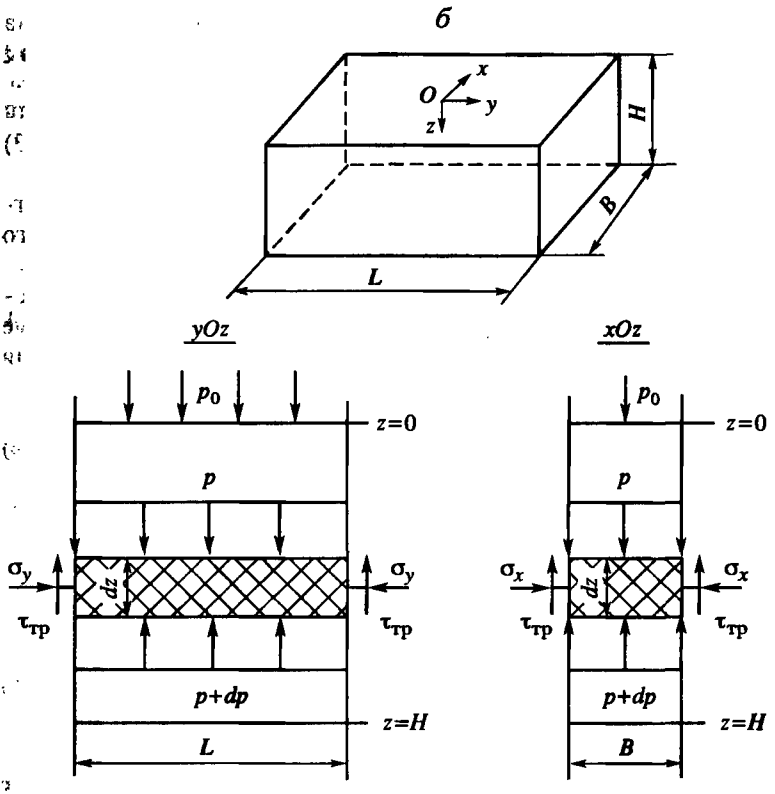
Рис. 8.4. Расчетные схемы прессования цилиндрических (*а*) и прямоугольных (*б*) шашек

плоскости, ортогональные к оси матрицы, остаются плоскими до конца процесса прессования. В этом случае задача аналитического распределения напряжений (поля напряжений) только по высоте прессовки становится тривиально простой; ее решение приведено далее.

При прессовании цилиндрических канальных и сплошных шашек вначале рассмотрим аналитическое решение задачи одностороннего прессования порошкообразного материала в замкнутой цилиндрической матрице, внутри которой установлена цилиндрическая игла (случай прессования канальных изделий) с учетом гипотезы плоских сечений.

При решении задачи примем следующие допущения.

1. Инерционные и массовые силы не учитываются из-за их незначительности по сравнению с поверхностными силами (силами давления). Тогда вместо уравнений движения сплошной среды можно использовать уравнения статического равновесия, т. е. решать «квазистатическую» задачу.



2. Стенки матрицы и иглы по сравнению с уплотняемым материалом принимаются абсолютно жесткими, а деформации материала вдоль вертикальной оси z значительно превосходят деформации вдоль двух других ортогональных осей r и θ (используется цилиндрическая система координат). Тогда приближенно можно считать, что

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \xi\sigma_z = \xi p, \tag{8.2}$$

где σ_r, σ_θ, σ_z – нормальные составляющие тензора напряжений; ξ – коэффициент бокового давления.

3. Влияние воздуха в прессуемом материале и возможное изменение температуры не учитываются.

При принятых допущениях задача становится достаточно простой и сводится к решению одного уравнения статики. Расчетная схема задачи показана на рис. 8.4, *а*. Рассмотрим равновесие выделенного эле-

ментарного слоя прессуемого материала. С учетом действующих на слой силовых факторов уравнение его равновесия в направлении оси z запишется:

$$\pi R_1^2(1-\alpha^2)p - \pi R_1^2(1-\alpha^2)(p+dp) - 2\pi R_1(\tau_1 + \alpha\tau_0)dz = 0, \qquad (8.3)$$

где α – отношение радиусов внутренней поверхности матрицы R_1 и иглы R_0; $\alpha = R_0/R_1$; τ_1, τ_0 – напряжения внешнего трения порошкового материала на поверхности соответственно матрицы и иглы.

В процессе прессования происходит скольжение материала относительно поверхности матрицы. Возникающие при этом контактные напряжения трения подчиняются закону «сухого» трения скольжения (закон Кулона) и поэтому

$$\tau_1 = f_1\sigma_r, \quad \tau_0 = f_0\tau_1, \qquad (8.4)$$

где f_1, f_0 – коэффициенты внешнего трения скольжения на поверхности соответственно матрицы и поверхности иглы.

Если $f_0 = f_1 = f_{тр}$, то $\tau_1 = \tau_0 = \tau_{тр} = \xi f_{тр}\, p$.

С учетом выражений (8.4) из совместного решения (8.2) и (8.3) получим

$$\frac{dp}{p} = -\frac{2\xi f_{тр}}{R_1(1-\alpha)}dz. \qquad (8.5)$$

Заметим, что в правую часть уравнения (8.5) входит произведение коэффициента бокового давления ξ на коэффициенты внешнего трения скольжения $f_{тр}$. Каждый из сомножителей является переменным, зависящим не только от физических свойств прессуемого материала, но и от давления прессования или плотности материала (см. гл. 2). При этом с увеличением давления прессования ВВ значение коэффициента $f_{тр}$ снижается, а коэффициента ξ увеличивается. В результате можно принять, что произведение $\xi f_{тр}$ является величиной постоянной в пределах изменения давлений по высоте прессуемого материала.

Интегрируем уравнение (8.5) и с учетом граничного условия, что при $z = 0$ давление p равно начальному давлению p_0, получим

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{2f_{тр}\xi z}{R_1(1-\alpha)}\right), \qquad (8.6)$$

Давление $p_0 = \dfrac{P(t)}{\pi R_1^2(1-\alpha^2)}$,

где $P(t)$ – усилие прессования в данный момент времени t.

Уравнение (8.6) позволяет найти действующие в прессуемом материале напряжения (давления) на любом растоянии от поверхности пуансона. Наименьшее давление в материале будет на уровне поддона при $z = H$:

$$p_н = p_0 \exp\left(-\frac{2f_{тр}\xi H}{R_1(1-\alpha)}\right),$$

где H – высота прессовки.

В случае прессования сплошных цилиндрических изделий ($\alpha = 0$, $R_1 = R$)

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{2f_{тр}\xi H}{R}\right). \qquad (8.7)$$

Уравнения (8.1) и (8.6) позволяют определить плотность по высоте изделия. Для сплошных изделий

$$\rho = \rho_{пр} - k_{нп} \exp\left[-\alpha_{пс} p_0 \exp\left(-\frac{2f_{тр}\xi z}{R}\right)\right]. \qquad (8.8)$$

В зависимости от того, для истинной или технологической кривой прессования были найдены постоянные $\rho_{пр}$, $k_{нп}$, $\alpha_{пс}$, можно подсчитать плотность в любом сечении прессовки (под нагрузкой или в свободном состоянии после извлечения из матрицы). Напомним, что постоянные должны быть найдены для условий прессования, когда влияние сил трения должно быть исключено или сведено к минимуму. Иначе при определении плотности по уравнению (8.8) трение будет учтено дважды, а результаты расчетов окажутся неверными. Значение коэффициента бокового давления ξ определяется экспериментально или рассчитывается по формуле (2.20). Методики экспериментального определения и значения коэффициента бокового давления приведены в работах [4–6].

При прессовании прямоугольных шашек применимы те же допущения, что и при прессовании цилиндрических шашек. Поскольку деформации вдоль направления прессования (оси z) значительно превосходят деформации вдоль двух других координат x и y (используется прямоугольная система координат), приближенно можно считать, что

$$\sigma_x = \sigma_y = \xi\sigma_z = \xi p. \qquad (8.9)$$

Расчетная схема задачи показана на рис. 8.4, *б*. Рассмотрим равновесие выделенного элементарного слоя прессуемого материала. С уче-

том действующих на слой силовых факторов уравнение его равновесия в направлении оси z запишется:

$$pBL - (p + dp)BL - 2f_{тр}\xi p(L + B)dz = 0, \tag{8.10}$$

где B, L – размеры прессовки в плоскости, ортогональной оси z.

Интегрируем уравнение (8.10) и с учетом граничного условия, что при $z = 0$ давление $p = p_0 = P(t)/BL$, получим

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{2f_{тр}\xi(L+B)z}{BL}\right). \tag{8.11}$$

Наименьшее давление в материале будет на уровне поддона при $z = H$:

$$p_н = p_0 \exp\left(-\frac{2f_{тр}\xi H(L+B}{BL}\right), \tag{8.12}$$

Уравнения (8.1) и (8.11) позволяют определить плотность по высоте изделия.

Распределение напряжений (давлений) и плотности в шашке при двустороннем прессовании определяется следующим образом. В матрицу устанавливают два пуансона, и усилие прессования $P(t)$ прикладывается к двум пуансонам одновременно. Для этого случая прессования напряженно-деформированное состояние в шашке симметрично сечению $z = H/2$. Тогда достаточно рассмотреть распределение давлений и плотности при $0 \leqslant z \leqslant H/2$, а противоположную половину шашки представить в зеркальном изображении.

Распределение давлений по высоте одной из половины шашек будет определяться по уравнению (8.6) или (8.11), а распределение плотности – с использованием уравнения (8.1). Наименьшее давление в прессуемом изделии будет в среднем сечении шашки при $z = H/2$. В этом же сечении заряда возникает и наименьшая плотность материала.

Распределение напряжений и плотности в объеме шашки при прессовании определяется следующим образом. В приведенных выше теоретических зависимостях для определения напряжений (давлений) по высоте шашки использовалось допущение о равномерном распределении напряжений в поперечном сечении шашки – гипотеза «плоских сечений». На самом деле при прессовании порошкообразных материалов значения напряжений меняются не только по высоте, но и в поперечном оси шашки направлении или направлениях (при прессовании прямоугольных шашек).

В ряде случаев, особенно при прессовании относительно высоких шашек, необходимо уметь рассчитывать распределение напряжений и плотности и по высоте, и по радиусу шашки (например, при прессовании цилиндрических изделий).

Математические сложности при аналитическом описании задачи прессования порошкообразного материала в матрице без применения гипотезы «плоских сечений» ограничивают возможности рассмотрения ее решения в данной книге; подробное решение задачи приведено в [4].

В окончательном виде выражение для определения осевого давления в любой точке шашки:

$$p = \frac{p_0}{1 + f_{тр}\xi\alpha}\left[1 - \frac{f_{тр}\sqrt{\xi}K\alpha I_0(\beta\bar{r})F(\bar{z})}{2I_1(\beta)}\right], \qquad (8.13)$$

где I_0, I_1 – функции Бесселя мнимого аргумента; $\bar{z} = z/R$; $\bar{r} = r/R$; α – отношение высоты H и радиуса R цилиндрической шашки.

Функция

$$F(\bar{z}) = \frac{chK(\alpha - \bar{z}) - chK\bar{z}}{chK\alpha - 1};\ \beta = K/\sqrt{\xi}.$$

Значение K определеяется из следующего выражения:

$$(chK\alpha - 1)shK\alpha - f_{тр}\sqrt{\xi}\frac{I_0(\beta)}{I_1(\beta)} = \frac{2}{K\alpha}.$$

Используя выражение (8.13) и уравнение прессования (8.1), можно рассчитать и значение плотности в любой точке объема шашки.

Внутренние остаточные напряжения в прессованных изделиях. Под *внутренними напряжениями* понимают систему напряжений, которые могут существовать в равновесии внутри тела, когда к его поверхности не приложены внешние силовые факторы. Если тело или его поверхность подвергались необратимому деформированию и затем внешние нагрузки удалялись, то в деформируемых областях и вокруг них будут действовать внутренние напряжения, которые в этом случае называются *остаточными напряжениями.*

Остаточные напряжения возникают и в изделиях, получаемых прессованием порошкообразных материалов. Эти напряжения являются причиной возможного возникновения расслойных трещин и растрескивания изделий после извлечения их из матрицы или в период их хранения.

Остаточные напряжения могут быть первого, второго и третьего родов.

Остаточные напряжения, уравновешивающиеся в пределах областей, соизмеримых с размерами тела, получили название напряжений первого рода (остаточные макронапряжения). Напряжения второго рода уравновешиваются в пределах объемов, соизмеримых с размерами отдельных частиц (зерен) — составных элементов структуры тела. Напряжения третьего рода (их можно назвать элементарными) уравновешиваются в объемах одного порядка с элементарной кристаллической ячейкой отдельных частиц или зерен материала.

Для определения внутренних остаточных напряжений разработаны экспериментальные методы, которые могут быть разделены на две основные группы: механические и физические.

Механические методы служат для определения внутренних остаточных макронапряжений. Поскольку макронапряжения уравновешены в объеме тела, то судить об их величине можно, лишь нарушив это равновесие. В основе всех механических методов лежит принцип — рассечение изделия с последующим замером изменений размеров в оставшейся части тела. По величине упругих деформаций определяют напряжения. Все механические методы определения внутренних остаточных напряжений связаны с полным или частичным разрушением изделия.

К физическим методам определения внутренних остаточных напряжений можно отнести: рентгенографический; поляризационно-оптический; метод, основанный на измерении твердости, и др. Следует отметить, что такие методы, как оптический, магнитный, измерения твердости, ультразвуковой и другие, не получили еще широкого распространения, хотя и имеют известные перспективы для определения остаточных напряжений в пористых изделиях из порошкообразных материалов без их разрушения.

Рассмотрим результаты исследований распределения внутренних остаточных напряжений в прессованных изделиях из алюминиевого порошка ПА-2 и порошка магния. Максимальное давление прессования составляло 400 МПа для алюминиевого порошка и 200 МПа для магниевого порошка.

Остаточные напряжения определялись методом Закса [4]. Для этого проводилось послойное рассверливание сплошных цилиндрических образцов с последующим измерением относительных продольных и поперечных деформаций. По измеренным деформациям вычислялись напряжения. На рис. 8.5, *а* приведены эпюры нормальных остаточных напряжений в образцах, спрессованных из алюминиевого порошка ПА-2 при давлении 400 МПа без последующей выдержки под постоянным давлением. Из анализа приведенных эпюр остаточных напряжений видно, что в центральных сечениях изделий реализуются

растягивающие осевые σ_z, радиальные σ_r и тангенциальные (окружные) σ_θ напряжения. При этом наибольшие значения имеют осевые напряжения; остаточные напряжения в наружных слоях не превышают соответствующих напряжений в центральной части прессовки.

Уровень растягивающих остаточных напряжений составил относительно малую величину – единицы мегапаскалей; для брикетов из алюминиевого порошка максимальная величина растягивающих осевых напряжений составила около 6 МПа. Однако и предел прочности на растяжение изделий из порошка алюминия ПА-2, полученный при давлении прессования 400 МПа, тоже исчисляется единицами мегапаскалей и для указанного случая составляет порядка 7 МПа.

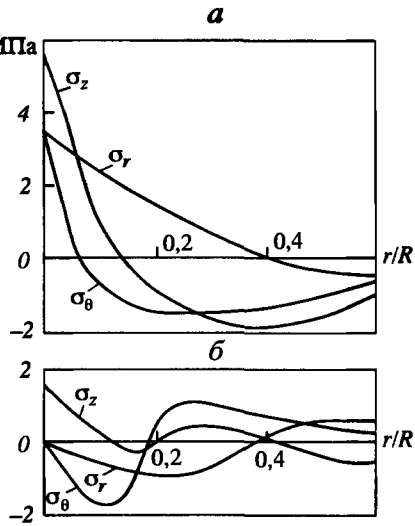


Рис. 8.5. Эпюры нормальных остаточных напряжений в прессовках из алюминиевого порошка ПА-2 (*а*) и порошка магния (*б*)

Подобные закономерности проявляются и в образцах, спрессованных из порошка магния при давлении 200 МПа (рис. 8.5, *б*) Наибольшее значение остаточных растягивающих напряжений и предел прочности на растяжение соответственно составляют: 0, 65 МПа и 0,8 ÷ 1,0 МПа для брикетов с плотностью 1450 кг/м^3 (давление прессования 100 МПа); 1, 4 МПа и 2 МПа для брикетов с плотностью 1610 кг/м^3 (давление прессования 200 МПа).

Таким образом, в случае прессования порошкообразных материалов без выдержки под постоянным давлением максимальные растягивающие остаточные напряжения сопоставимы с пределом прочности материала изделий. Это подтверждает то положение, что наличие в сечениях изделий растягивающих остаточных напряжений является причиной возникновения макротрещин, которые носят расслойный или кольцевой характер распределения в объеме извлеченного из матрицы изделия.

В ряде случаев снизить уровень остаточных напряжений удается подбором технологических режимов прессования. На рис. 8.6 представлены эпюры распределения внутренних остаточных напряжений в образцах, спрессованных из алюминиевого порошка ПА-2 при давле-

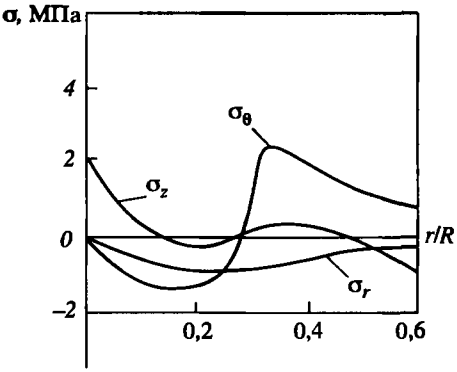


Рис. 8.6. Эпюры внутренних остаточных напряжений в прессовках из алюминиевого порошка ПА-2 с выдержкой под давлением

нии 400 МПа с выдержкой под постоянным давлением в течение 30 с после окончания активного процесса прессования. Из данных рис. 8.6 видно, что выдержка изделий при постоянном давлении приводит не только к снижению уровня всех составляющих напряжений, но и существенно меняет их распределения по поперечному сечению. В результате выдержки под постоянным давлением в течение 30 с максимальная величина наиболее опасных растягивающих осевых напряжений снижается с 6,5 до 1,5 МПа.

На рис. 8.7 представлены экспериментальные зависимости изменения максимального осевого остаточного напряжения σ_z^{max} от времени выдержки под постоянным давлением в прессовках из алюминиевого и магниевого порошков. Эксперименты показали, что, начиная с некоторого значения времени выдержки $t_в$ под постоянным давлением прессования, дальнейшее увеличение продолжительности выдержки под давлением не приводит к существенным изменениям уровня значений остаточного напряжения σ_z^{max}. Для объяснения этого явления было сопоставлено время выдержки, после которого остаточные напряжения практически не изменяются, с реологическим параметром материала изделия – *временем релаксации*. (Сведения о явлениях релаксации напряжений при прессовании порошкообразных материалов в более расширенном представлении изложены в [4].) Следует напомнить, что под временем релаксации понимают время, в течение которого напряжение в теле при заданной де-

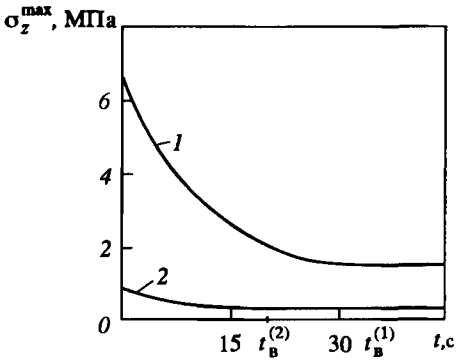


Рис. 8.7. Зависимость максимального остаточного нормального напряжения от времени выдержки под постоянным давлением в прессовке из алюминиевого порошка ПА-2 (*1*) и магниевого порошка (*2*)

формации уменьшается в e раз (здесь e – основание натурального логарифма).

Для брикетов из порошка алюминия ПА-2, полученных при давлении прессования 400 МПа, время релаксации $t_р = 20 \div 22$ с. Как видно, время релаксации этого материала близко к значению времени выдержки $t_в^{(1)} = 30$ с (см. рис. 8.7), после которого не происходит заметного уменьшения остаточных напряжений. В процессе выдержки под постоянным давлением происходит уменьшение абсолютных остаточных напряжений, а также изменение характера их распределения и знаков. Поэтому выдержка изделий под постоянным давлением в течение времени, соизмеримого с временем релаксации, приводит к снижению уровня опасных растягивающих остаточных напряжений, и дальнейшее увеличение времени выдержки не дает существенного эффекта.

Последнее обстоятельство подтвердили опыты и с другими прессованными материалами. Так, в брикетах из порошка обработанного магния, полученных при давлении прессования 200 МПа, время релаксации $t_р = 15 \div 18$ с. Выдержка изделий под постоянным давлением в течение $t_в^{(2)} = 20$ с снижает остаточные растягивающие напряжения с 1,0–2,0 МПа до уровня соответственно 0,4–0,6 МПа. Дальнейшее увеличение выдержки не дает значительных эффектов по снижению уровня остаточных напряжений.

Обнаружено, что с течением времени при хранении некоторых прессованных веществ их прочность возрастает. Так как этот процесс при комнатной температуре происходит самопроизвольно, без каких-либо дополнительных воздействий, будем называть его *самоупрочнением*. Процесс самоупрочнения вначале протекает более быстро, а затем скорость его кинетики уменьшается. Отношение прочности прессованных образцов по прошествии определенного времени к их первоначальной прочности назовем *коэффициентом самоупрочнения* $K_с$.

Если коэффициент самоупрочнения определять по результатам испытания прочности прессовок на сжатие, то

$$K_с = \sigma_{сж}(t)/\sigma_{сж},$$

где $\sigma_{сж}$, $\sigma_{сж}(t)$ – прочности на сжатие соответственно первоначальная и по прошествии времени t после прессования.

На рис. 8.8 приведены значения $K_с$ для прессованных энергонасыщенных материалов в зависимости от времени при 20 °С. Если рассматривать механизм самоупрочнения в той или иной мере аналогичным процессу спекания, то вполне понятно, что у легкоплавкого тротила ($T_{пл} = 79{,}5 \div 81{,}5$ °С) при температуре 20 °С этот процесс должен быть более значительным, чем у более тугоплавкого тетрила ($T_{пл} = 132$ °С) и состава А-IX-1 (флегматизированный гексоген), имеющего еще более

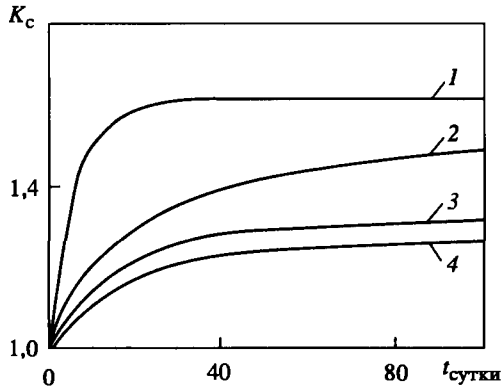


Рис. 8.8. Зависимость коэффициента самоупрочнения Кс от времени прессования:
1 – тринитротолуола; *2* – тетрила; *3* – состава А-IX-1; 4 – состава А-IX-2

высокую температуру плавления (около 203 °С). Поэтому явление самоупрочнения этих веществ наблюдается в меньшей степени по сравнению с тротилом.

На явление самоупрочнения существенное влияние оказывает размер частиц прессованных сыпучих материалов. Эксперименты, проведенные В.А. Симоновым, Г.В. Бельченко, А.Н. Илларионовым, показали, что с уменьшением размера частиц эффект самоупрочнения возрастает. Чем меньше частиц, тем больше их удельная поверхностная энергия и тем в большей мере проявляется действие факторов, приводящих эту поверхностную энергию к минимальному равновесному состоянию.

Упорядоченная структура пористых тел обусловливает *анизотопию* их физических свойств (механических, оптических, магнитных, электрических и т. д.).

В большинстве случаев всегда имеется различие в сопротивлении деформированию и разрушению по отношению к выбранным осям координат в пространстве. Следует различать деформационную и прочностную анизотропии.

Деформационная анизотропия проявляется при любой упорядоченности текстуры: общей по всему объему тела или в объеме группы частиц структуры тела. Некоторые варианты возможной текстуры пористых тел при деформировании в зависимости от вида напряженного состояния были рассмотрены ранее.

Анизотропия прочности требует специального рассмотрения. Опытами ряда исследователей показано [5], что прочность при растяжении, сжатии и сдвиге изделий, изготовленных из сыпучих материалов прессованием, в направлении прессования больше, чем в поперечном

направлении. Так, в цилиндрических образцах прессованного чешуированного тротила при плотности 1200 кг/м^3 прочность на сжатие ($\sigma_{сж}$) в направлении прессования в 2 раза превышает прочность в поперечном направлении. Для образцов прессованного порошкообразного состава А-IX-1 при плотности 1350 кг/м^3 это различие в прочностных свойствах еще больше: $\sigma_{сж} = 0{,}14$ МПа в направлении прессования и $\sigma_{сж} = 0{,}03$ МПа в поперечном направлении.

При одностороннем (осевом) прессовании в матрице имеются минимальное скольжение и смещение контактов между частицами по сравнению со всеми другими процессами. В образующей текстуре пористого тела частицы ориентированы базисными плоскостями ортогонально действию сжимающего усилия. Поперечное сечение тела имеет наибольшую контактную площадь для данного давления прессования. Это приводит к различию прочности в продольном и поперечном направлениях прессовки.

При низких плотностях прессовок разница между прочностью в продольном и поперечном направлениях велика. С увеличением давления прессования и возрастанием плотности пористых образцов разница в их прочностных свойствах по различным направлениям уменьшается. В некоторых случаях образцы начинают обладать изотропной прочностью. Показателем различия прочности в продольном и поперечном направлениях может служить их отношение, названное *коэффициентом анизотропии* ($K_А$):

$$K_А = \sigma_\perp / \sigma_\parallel,$$

где $\sigma_\perp$, $\sigma_\parallel$ – прочности на сжатие соответственно в продольном и поперечном направлениях.

Из данных рис. 8.9 видно, что коэффициент анизотропии для прессовок из тротила (*3*), составов А-IX-1 (*2*) и А-IX-2 (*1*) (смесь флегматизированного гексогена с 20% алюминиевой пудры) убывает по мере повышения плотности прессовок $\rho_п$. Наименьшая прочностная анизотропия из исследованных веществ наблюдается у наиболее пластичного и низкоплавкого тротила.

В работах Ю.М. Бальшина обращается внимание на тот факт, что анизотропия в свойствах прессованных тел также связана с явлением упругого последействия после выталкивания готовой прессовки из матрицы. При снятии внешней нагрузки (давления) упругое последействие приводит обычно (но не всегда) к некоторому увеличению (в пределах до 1%) размеров спрессованного тела. В результате происходят снижение контактного сечения в поперечной плоскости изделия и ослабление его прочностных свойств. При испытании на сжатие прессовки почти всегда разрушаются в поперечном сечении, а не в продольном по отношению к направлению приложения нагрузки.

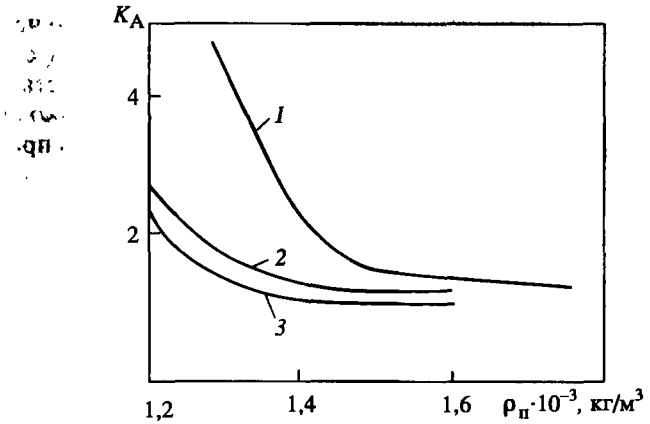


Рис. 8.9. Зависимость коэффициента анизотропии K_A от плотности прессовок

Одной из основных особенностей прессованных тел из сыпучих материалов является их *различие в сопротивлении сжатию и растяжению*, что сказывается на их прочностных и деформационных свойствах. В последующих главах будет показано, что это существенно влияет на напряженно-деформационное состояние прессуемых тел.

Наглядное представление о различии значений прочности прессованных изделий дает рис. 8.10, из которого видно, что наименьшую прочность тротил имеет при испытании на растяжение. Аналогичные закономерности наблюдаются и для прессовок из других сыпучих материалов.

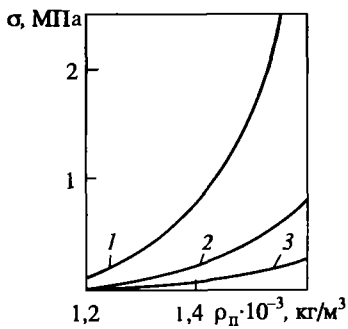


Рис. 8.10. Прочность прессовок из тринитротолуола при различной плотности при испытании:
1 – на сжатие; *2* – срез; *3* – растяжение

Природа указанной особенности состоит в следующем. Преобладающие связи между частицами в виде механического зацепления, твердых мостиков схватывания, адгезии и когезии связующего, наличие пор, микро- и макротрещин и других дефектов структуры прессованных изделий в значительно меньшей степени сопротивляются отрыву, чем сжатию; в последнем случае уменьшаются размеры пор и увеличивается контактное сечение в поперечной плоскости прессовки. Все это повышает прочность пористого тела и затрудняет его деформирование при сжимающих нагрузках.

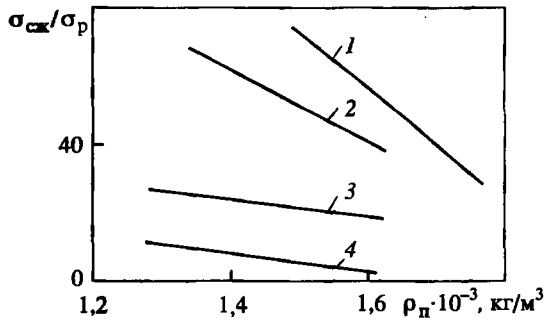


Рис. 8.11. Соотношение предельных напряжений на сжатие $\sigma_{сж}$ и растяжение $\sigma_р$ прессовок:
1 – состав А-IX-1; *2* – состав А-IX-2; *3* – тринитротолуол; *4* – тетрил

На рис. 8.11 приведены данные испытаний на одноосное сжатие и растяжение прессовок из тротила, тетрила, составов А-IX-1 и А-IX-2 различной плотности. На графиках показано соотношение предельных напряжений прочности сжатия ($\sigma_{сж}$) и растяжения ($\sigma_р$) прессовок при различной их плотности. Как видно из данных рис. 8.11, рассматриваемое отношение достигает больших значений: 25,7 у тротила при плотности прессовки 1300 кг/м^3; 62,0 у состава А-IX-1 при плотности прессовки 1400 кг/м^3.

Очевидно, что с уменьшением плотности и связности между частицами соотношение напряжений $\sigma_{сж}/\sigma_р$ будет возрастать. Для несвязных, идеально сыпучих материалов соотношение $\sigma_{сж}/\sigma_р$ достигает бесконечности, поскольку у таких сред $\sigma_р = 0$. Наоборот, с увеличением плотности и контактной площади между частицами и снижением объема пор указанное отношение напряжений будет снижаться. Но даже при высокой плотности прессовок из состава А-IX-1, равной 1600 кг/м^3 (в два раза большей насыпной), отношение напряжений $\sigma_{сж}$ и $\sigma_р$ достигает 40.

Прессовки из тетрила и тротила – материалов с большей пластичностью, чем состав А-IX-1, имеют, как правило, объемно-связную текстуру с развитыми зонами межчастичного контакта. Такие структуры обладают лучшим сопротивлением к действию растягивающих напряжений при уменьшении объема пор, чем структуры, в которых преобладают связи механического взаимодействия между частицами.

Отдельные вопросы, связанные с прочностью пористых изделий, полученных компактированием сыпучих материалов давлением, рассмотрены в работах [4, 5].

8.2. Формирование патронов промышленных взрывчатых веществ шнекованием [1, 2, 7, 8]

Общие сведения. Методом шнекования обычно снаряжают патроны из аммонитов, не содержащих в своем составе очень чувствительных к трению взрывчатых компонентов. Например, скальные аммониты, содержащие гексоген, прессуют в виде шашек, а из шашек формируют заряды с оболочкой (гильзой).

В большом количестве для взрывных работ выпускаются стандартные патроны диаметром 32, 45, 60 и 90 мм и массой соответственно 200–3000 г в бумажной влагоизолированной или полиэтиленовой оболочке. Плотность зарядов ВВ патронов составляет 1000–1200 кг/м^3. Наиболее часто употребляются патроны массой 200 г и диаметром 31–32 мм.

При современных способах взрывания шпуровыми зарядами в качестве промежуточного детонатора часто применяют обычные стандартные патроны из аммонита 6ЖВ необходимых диаметра и массы. Патроны достаточно безопасны в обращении и безотказно возбуждаются от ДШ нормальной мощности при соответствующем их монтаже на месте применения в патрон-боевик.

Основные характеристики штатных патронов-боевиков аммонита 6ЖВ [1]

	ПН-А6ЖВ-30	ПН-А6ЖВ-90
Форма	Цилиндрическая	
Диаметр, мм	31–32	88–92
Длина, мм	230–260	440–550
Масса ВВ, г	200	2500

В отдельных случаях (по заказу потребителя) изготовляют патроны-боевики диаметром 60 мм и массой 1,5 кг, а также патроны в полиэтиленовой оболочке марки ЗНП-А6ЖВ-90.

Бумажные гильзы патронов скатывают из бумаги плотностью не менее 35 г/м^2 и не более 50 г/м^2 в 2–2,5 оборота. Масса гильзы должна быть такой, чтобы на 100 г ВВ приходилось не более 2 г бумаги. Это ограничение необходимо во избежание образования вторичного пламени, искр и избыточного количества оксида углерода при взрыве. Гильза патрона снаружи покрывается тонким слоем влагоизолирующего материала – парафина или его смеси с петролатумом в соотношении 50:50 или лаком. Количество парафина не должно быть больше 2,5 г на 100 г взрывчатого вещества.

В угольных шахтах применяют патроны в двустенных полиэтиленовых *предохранительных оболочках* типов ПВП-1-У, ПВП-1-А и СП-1 [7]. Все они имеют однотипное устройство (рис. 8.12). Взрывчатое ве-

щество *2* находится в оболочке, состоящей из корпуса *3* с двойными стенками, образованными двумя ампулами с толщиной стенок 0,8–1,2 мм. Между стенками помещены два центрирующих кольца *4* для жесткости патрона. Сверху патрон закрыт крышкой *1*. Наружный диаметр оболочки составляет 38–39 мм, внутренний 27–28 мм. Длина патронов ПВП-1-А и СП-1 составляет 345 мм, патронов ПВП-1-У 245 мм.

В качестве ВВ используются ПЖВ-20 (для патронов ПВП-1-У и ПВП-1-А) и угленит Э-6 (для патронов СП-1). Межампульное пространство шириной 4–5 мм заполнено раствором *5* аммиачной селитры и пенообразователем. Раствор аммиачной селитры увеличивает фугасное действие взрыва заряда и осуществляет пламегасящееся воздействие. Раствор не замерзает при отрицательных температурах до минус 15 °С; оболочка сохраняет эластичность.

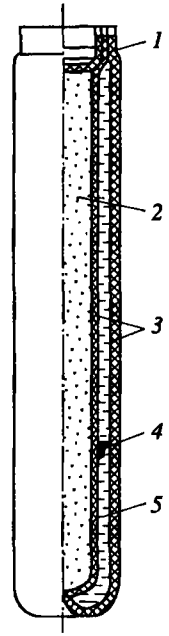


Рис. 8.12. Схема предохранительного патрона

Патроны в предохранительных оболочках, как правило, выпускаются небольшими партиями по заказу потребителя.

Технологический процесс патронирования. В этот процесс входят следующие операции:

- подготовка ВВ;
- подготовка оболочки;
- формование заряда или собственно патронирование;
- нанесение влагоизолирующего покрытия (для бумажных оболочек);
- укупорка и транспортирование на склад;
- контроль взрывчатых веществ и патронов.

Наиболее ответственной фазой производства патронов является операция формования заряда (заполнения оболочки).

Заполнение оболочек обеспечивается по следующей схеме. Уплотнение сыпучих ВВ и формование из них заряда в замкнутой оболочке показано на рис. 8.13. Винтовой нагнетатель (шнек) *2*, приводимый во вращение от привода электродвигателя, захватывает сыпучий материал из бункера *1*, транспортирует его вдоль трубки *3* и подает его в обо-

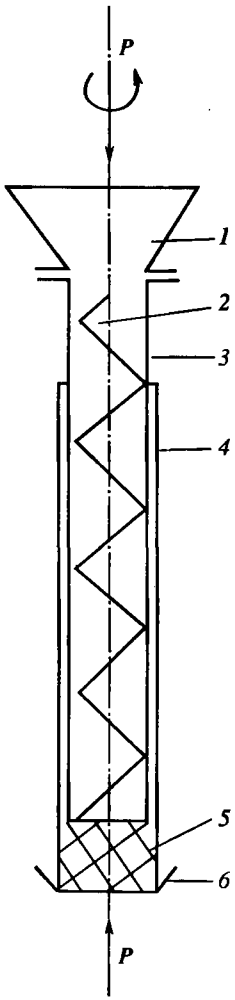


Рис. 8.13. Схема шнекового снаряжения оболочки патрона

лочку *4*. Давление со стороны перерабатываемого материала на шнек уравновешивается действием противодавления. Преодолевая усилие противодавления, оболочка *4* вместе с устройством *6* для крепления ее нижнего торца постепенно перемещается вниз по трубке *3*. Во внутренней полости оболочки формируется пористое тело *5* из уплотненного твердого дисперсного материала. Необходимое усилие шнекования и плотность заряда регулируются силой противодавления *P*.

Аппарат, состоящий из вращающегося шнека, гидравлического устройства для создания противодавления, бункера и приспособлений для установки и закрепления оболочки, называется *патранирующим шнек-автоматом*. Он может быть вертикального и горизонтального типов. При патронировании ВВ в бумажные оболочки последние формируются перед заполнением ВВ приспособлениями шнек-автоматов.

Качественный анализ явлений при шнековании заключается в следующем. Основным рабочим органом, заполняющим оболочки сыпучим материалом и формирующим пористое тело, является шнек (рис. 8.14, [4]). В результате силового воздействия со стороны винтовой нарезки шнека и возникающих сил трения на внутренней поверхности трубки *3* (см. рис. 8.13) сыпучий материал перемещается вдоль оси шнека, уплотняется и постепенно приобретает более компактную плотную структуру. Основное силовое взаимодействие между перерабатываемым материалом и шнеком происходит в винтовом канале последних витков шнека, где материал ведет себя как монолитное сжимаемое тело *5*. Таким образом, вдоль винтовой нарезки шнека в зависимости от состояния перерабатываемого ВВ можно условно выделить три зоны; транспортирования, подпрессовки (или промежуточную зону) и прессования.

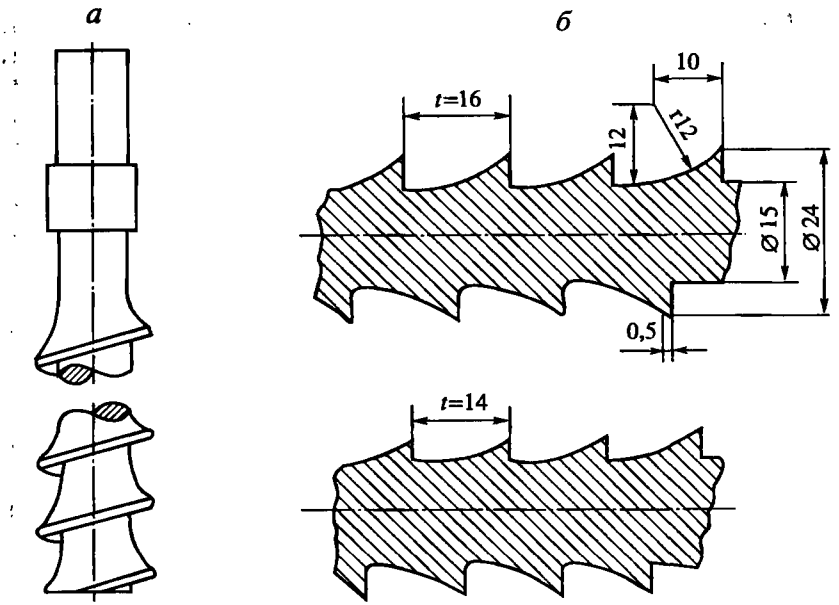


Рис. 8.14. Общий вид (*а*) и профиль (*б*) винтовой нарезки шнека

В зоне транспортирования, которая начинается еще в загрузочном бункере, материал представляет собой сыпучую массу с некоторой насыпной плотностью $\rho_н$. Зону транспортирования, ответственную за производительность процесса шнекования, следует рассматривать при анализе вопросов, связанных с определением производительности шнековых аппаратов. Вдоль этой зоны не происходит заметного изменения физико-механических свойств сыпучего материала и их можно считать постоянными. Для сыпучего материала в этой зоне могут быть применены законы механики сыпучих сред.

В зоне прессования перерабатываемый материал можно рассматривать как пористое сжимаемое монолитное тело; между ним, шнеком и внутренней поверхностью трубки (внутри которой вращается шнек) происходит основное силовое взаимодействие.

При шнековом заполнении оболочек наибольшая плотность ВВ вдоль радиуса поперечного сечения заряда наблюдается в зоне под ребордой (винтовой нарезки) шнека; плотность ВВ уменьшается к его центральной оси.

Расчет основных параметров процесса шнекования. В эту задачу входят расчет силовых параметров, определение зависимости плотности дисперсного материала от среднего нормального напряжения и расчет энергетических параметров.

Расчет силовых параметров заключается в следующем. Для определения напряжений и плотности в поперечном сечении изделия, получаемых шнекованием сыпучего материала, необходимо представить картину модельной системы, по которой в дальнейшем будут производиться математические операции. Как было показано при качественном анализе процесса шнекования сыпучих материалов, основное силовое взаимодействие между уплотняемым материалом и шнеком производится на уровне последнего витка шнека. Поэтому при решении задачи будем определять распределение напряжений и плотности в поперечном сечении заряда на уровне последнего витка шнека.

Наибольшее (активное) давление на материал шнек оказывает под ребордой последнего витка. Центральная часть заряда уплотняется за счет способности сыпучего материала создавать радиальные напряжения как реакцию на осевое давление со стороны реборды шнека. Для материалов, имеющих зернисто-пористую структуру, эти напряжения меньше по сравнению с давлением под ребордой шнека.

Расчетная схема действия сил при шнековании представлена на рис. 8.15. Здесь же показаны необходимые для расчетов характеристики шнека: R_0, R_1 – соответственно внутренний и наружный радиусы

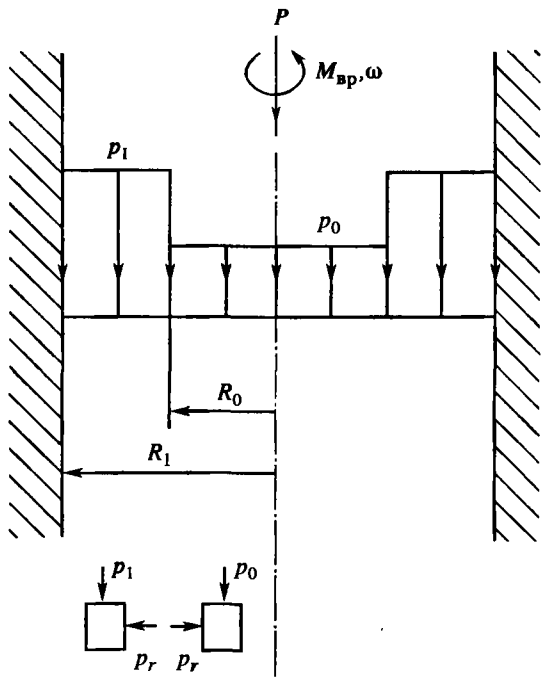


Рис. 8.15. Расчетная схема шнекования

винтовой нарезки; P – усилие противодавления; $M_{кр}$ – крутящий момент на оси шнека; ω – угловая частота вращения шнека.

Активное давление ребоды шнека на уплотняемый материал представим как нормальное давление p_1, равномерно распределенное по кольцевой поверхности шириной $R_1 - R_0$. В зоне под пятой шнека ($0 \le r < R_0$) действует равномерно распределенное пассивное давление p_0. Координата $r = R_0$ является точкой разрыва. Для оценочных расчетов можно принять, что левее точки разрыва (см. рис. 8.15) радиальное давление $p_r < p_1$ и $p_r = \xi p_1$, [здесь ξ – коэффициент бокового давления, определяемый по формуле (2.20)].

Правее точки разрыва $p_r > p_0$ и $p_0 = \xi p_r$; в результате получим, что

$$p_0 = \xi^2 p_1. \tag{8.14}$$

В точке разрыва ($r = R_0$) $p = (p_1 + p_0)/2 = p_1(1 + \xi^2)/2$.

Равновесие сил, действующих на шнек, представим в виде

$$P = \pi R_1[(1 - \alpha^2)p_1 + \alpha^2 p_0], \tag{8.15}$$

где α – отношение радиусов винтовой нарезки; $\alpha = R_0/R_1$.

Из совместного решения уравнений (8.14) и (8.15) получим

$$p_1 = \frac{P}{\pi R_1^2[1 - \alpha^2(1 - \xi^2)]}. \tag{8.16}$$

Инвариантное представление зависимости плотности дисперсного материала от среднего нормального напряжения можно осуществить следующим образом. Как было показано в гл. 4, уплотнение твердого дисперсного материала сопровождается деформацией формы и изменением объема. Количественное изменение объема характеризуется относительной объемной деформацией ε_V, которая является аналогом изменения плотности ρ, поскольку

$$\varepsilon_V = 1 - \rho_н/\rho. \tag{8.17}$$

Показатель ε_V определяется средним нормальным напряжением $\sigma_{ср}$ – *линейным инвариантом тензора напряжений.* Поэтому можно считать, что плотность сыпучего материала также является некоторой функцией среднего нормального напряжения, т. е.

$$\rho = \rho(\sigma_{ср}). \tag{8.18}$$

Таким образом, в рамках квазистатической задачи при изотермических условиях среднее нормальное напряжение (как линейный инва-

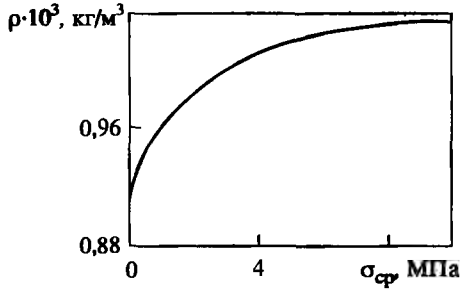


Рис. 8.16. Зависимость $\rho - \sigma_{ср}$ для состава 6ЖВ

риант напряженного состояния) однозначно определяет плотность материала для любого случая сложного напряженного состояния в данной точке среды. При этом зависимость $\rho = \rho(\sigma_{ср})$ является также инвариантом относительно способа статического уплотнения материала давлением. Здесь имеется в виду, что независимо от способа статического компактирования сыпучего материала для одного и того же значения $\sigma_{ср}$ при всех остальных равных условиях плотность ρ имеет одно и то же значение.

На рис. 8.16 представлены графические зависимости $\rho - \sigma_{ср}$ для аммонита 6ЖВ в интервале изменения $\sigma_{ср}$ от 0 до 20 МПа.

Среднее нормальное напряжение для зоны $r > R_0$ (см. рис. 8.15)

$$\sigma_{ср} = \frac{1+2\xi}{3} p_1, \tag{8.19}$$

для зоны $r < R_0$

$$\sigma_{ср} = \frac{1+2\xi}{3} p_0, \tag{8.20}$$

в точке разрыва $r = R_0$

$$\sigma_{ср} = \frac{(1+2\xi)(1+\xi^2)}{6} p_1. \tag{8.21}$$

Зная значения $\sigma_{ср}$ из графика $\rho - \sigma_{ср}$, можно найти значения плотности в различных зонах поперечного сечения заряда.

Пример расчета. Рассчитать значения плотности в различных зонах поперечного сечения заряда патрона аммонита 6ЖВ диаметром 31 мм. Размеры шнека: $R_0 = 8$ мм; $R_1 = 14$ мм ($\alpha = R_0/R_1 = 8/14 = 0{,}57$); усилие противодавления $P = 6000$ Н; характеристика состава 6ЖВ: насыпная плотность $\rho_н = 900$ кг/м^3; угол внутреннего трения $\varphi = 30°$; коэффициент аутогезии $k_1 = 0{,}1$.

Из выражения (8.20) определяем значение коэффициента бокового давления $\xi = (3 - 3{\cdot}0{,}5 - 2{\cdot}0{,}1{\cdot}0{,}87)/(3 + 3{\cdot}0{,}5 + 4{\cdot}0{,}1{\cdot}0{,}87) = 0{,}35$. Из уравнений (8.14) и (8.16); $p_1 = 6000/\{3{,}14(1{,}4)^2{\cdot}[(1 - (0{,}57)^2 + (0{,}57)^2{\cdot}(0{,}35)^2]\}{\cdot}10^4 \equiv 13{,}6$ МПа; $p_0 = 13{,}6{\cdot}(0{,}35)^2 = 1{,}6$ МПа.

Значения среднего нормального напряжения [см. формулы (8.19)–(8.21)]: $\sigma_{ср} = (1+2{\cdot}0{,}35){\cdot}13{,}6\ /3 = 77{,}2$ МПа (зона $r > R_0$); $\sigma_{ср} = (1 + 20{,}35){\cdot}1{,}6/3 = 9{,}2$ МПа (зона $r < R_0$); $\sigma_{ср} = (77{,}2 + 9{,}2)/2 = 43{,}2$ МПа (в точке $r = R_0$).

Из графика зависимости $\rho - \sigma_{ср}$ (см. рис. 8.16) для аммонита 6ЖВ получим следующие значения плотности: $\rho = 1250$ кг/м^3 (в зоне $r > R_0$); 1100 (в точке $r = R_0$); 970 (в зоне $r < R_0$).

Энергетические параметры рассчитываются следующим образом. Потребляемая в процессе шнекования сыпучих материалов мощность зависит от интенсивности энергозатрат в пределах зон транспортирования, подпрессовки и прессования. Наибольший расход мощности требуется в зоне прессования, где возникают наибольшие давления в уплотняемом материале. В зоне транспортирования сыпучего материала потребляемая мощность невелика (обычно не более 10% суммарной мощности) и в практических расчетах ее можно не учитывать.

В зоне прессования потребляемая мощность на проведение технологического процесса

$$N = N_{пол} + N_{тр}, \tag{8.22}$$

где $N_{пол}$ – полезная мощность, расходуемая на уплотнение и выдавливание материала; $N_{тр}$ – мощность, расходуемая на преодоление сил трения.

Полезная мощность

$$N_{пол} = \frac{p_1 Q \rho_н}{\rho_{из}} = \frac{p_1 Q}{k_{сж}}, \tag{8.23}$$

где Q – объемная подача сыпучего материала, м^3/с; $\rho_{из}$ – плотность заряда патрона; $k_{сж}$ – коэффициент сжатия материала в шнеке; $k_{сж} = \rho_{из}/\rho_н$.

Объемная подача сыпучего материала шнеком определяется с помощью следующего выражения:

$$Q = \psi Q_{max}, \tag{8.24}$$

где ψ – коэффициент наполнения сыпучим материалом витков шнека; $\psi = 0{,}50 \div 0{,}75$ (для вертикального расположения шнека); $\psi = 0{,}25 \div 0{,}32$ (для горизонтального расположения шнека); Q_{max} – теоретическая максимальная объемная подача сыпучего материала в канале шнека, когда он перемещается как твердое тело.

Подача

$$Q_{max} = 0{,}5k_{ф}R_1^2(1-\alpha^2)(L-me)\omega, \tag{8,25}$$

где $k_{ф}$ – коэффициент формы винтового канала, учитывающий возможное отклонение действительного профиля нарезки шнека от теоретического прямоугольного канала; $k_{ф} = \dfrac{V_{в}}{\pi R_1^2(1-\alpha^2)(L-me)}$ (здесь $V_{в}$ – действительный объем одного витка канала шнека, для прямоугольного сечения шнека $k_{ф}=1$; L, m, e – соответственно шаг, число заходов и толщина винтовой нарезки шнека); ω – угловая частота вращения шнека.

Мощность, расходуемая на преодоление сил трения,

$$N_{тр} = M_{тр}\omega = (M_{т} + M_{з.п})\omega, \tag{8.26}$$

где $M_{тр}$ – суммарный момент сил трения на валу шнека; $M_{т}$, $M_{з.п}$ – моменты сил трения соответственно на торце шнека и по длине зоны прессования.

Момент сил трения на торце шнека можно представить как сумму моментов сил трения под пятой и ребордой шнека:

$$M_{т} = 2\pi\int_{R_0}^{R_1} f_{тр}p_1r^2dr + 2\pi\int_{0}^{R_0} f_{тр}p_0r^2dr, \tag{8.27}$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения скольжения перерабатываемого материала на поверхности шнека.

С учетом выражений (8.14) и (8.16) момент сил трения на торце шнека

$$M_{т} = \frac{2}{3}Pf_{тр}R_1\frac{1-\alpha^3(1-\xi^2)}{1-\alpha^2(1-\xi^2)}. \tag{8.28}$$

Момент сил трения по длине зоны прессования

$$M_{з.п} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4, \tag{8.29}$$

где M_1 – момент сил трения материала по поверхности трубки шнекового устройства; M_2, M_4 – моменты сил трения соответственно по боковой и внешней поверхностям реборды шнека; M_3 – момент сил трения на цилиндрической поверхности шнека.

Используя результаты аналитического определения составляющих момента сил трения по длине шнекового канала при уплотнении твердых дисперсных материалов работы [4], для расчета момент сил трения по поверхности корпуса пресса

$$M_1 = \frac{m\xi f_{тр} W R_1 p_1}{a \operatorname{tg}\theta_{ср}}, \qquad (8.30)$$

$$a = 2f_{тр}/[(R_1 - R_0)\sin\theta_{ср}],$$

где W – ширина винтового канала; $\theta_{ср}$ – средний угол наклона винтовой линии к плоскости, ортогональной оси шнека, для $R_{ср} = (R_0 + R_1)/2$;

Момент сил трения по боковой поверхности реборды шнека

$$M_3 = \frac{m f_{тр} R_1^2 \left(1 - \alpha^2\right) p_1}{a \operatorname{tg}\theta_{ср}}. \qquad (8.31)$$

Момент сил трения на цилиндрической поверхности шнека

$$M_3 = \frac{m\xi f_{тр} W R_0 p_1}{a tg\theta_{ср}}. \qquad (8.32)$$

Момент сил трения на внешней поверхности реборды

$$M_4 = \frac{(m+1)\xi f_{тр} e R_1 p_1}{a \operatorname{tg}\theta_{ср}}. \qquad (8.33)$$

Таким образом, выражения (8.28), (8.30)–(8.33) позволяют рассчитать потребляемую мощность на преодоление сил трения в зоне прессования шнекового пресса.

На практике часто используются шнеки, у которых $m = 1$, $e/W << 1$. Для этого случая мощность, потребляемая шнек-аппаратом для осуществления процесса шнекования (*технологическая расходуемая мощность*)

$$N = \frac{p_1 Q}{k_{сж}} + f_{тр} p_1 R_1^3 \omega \left[\frac{2}{3}\pi\left(1 - \alpha^3 + \alpha^3\xi^2\right) + \right.$$
$$\left. + \frac{W}{R_1^2 a \operatorname{tg}\theta_{ср}}\left(\xi(1+\alpha) + \frac{R_1}{W}\left(1 - \alpha^2\right)\right)\right]. \qquad (8.34)$$

Удельный расход энергии q определяется отношением технологической расходуемой мощности N к производительности пресса $G = \rho_н Q$:

$$q = \frac{N}{G} = q_{пол} k_{тех}, \qquad (8.35)$$

где $q_{пол}$ – *полезный удельный расход энергии*, расходуемой на компактирование сыпучего материала давлением и выдавливанием в оболочку в процессе шнекования; $q_{пол} = N_{пол}/G$; $k_{тех}$ – *коэффициент технологической эффективности* при компактировании сыпучих материалов давлением; $k_{тех} = 1/\eta$ (здесь η – коэффициент полезного действия; $\eta = N_{пол}/N$ (обычно при шнековании ВВ $\eta \approx 0{,}28 \div 0{,}32$).

8.3. Патронирование взрывчатых веществ виброуплотнением [1, 4]

Общие сведения. Методы вибрационного формования оболочек ВВ можно подразделить на объемное вибрационное формование, при котором материал и оболочка во всем объеме подвергаются вибрированию при помощи *вибрационных площадок*, и формование с поверхностным вибрированием, когда части объема изделия со стороны какой-либо поверхности сообщается вибрация. Такая классификация носит условный характер, так как волновые колебания в той или иной степени интенсивности воздействуют на весь объем уплотняемого твердого дисперсного тела.

Применение вибрации в процессах структурообразования дисперсных материалов, компактирования твердых сыпучих тел давлением в целом ряде случаев позволяет снижать контактные силы трения и получать более качественные изделия с лучшим распределением плотности при меньших давлениях нагружения.

Уменьшение потерь на трение приводит к увеличению средней плотности брикетов по сравнению со статическим прессованием при одинаковых давлениях формования. Наблюдаемые эффекты можно объяснить тем, что распределение упругих волн вибрации вызывают колебание частиц в объеме материала около положения своего равновесия, исключаются «арочные» эффекты и создается более упорядоченная укладка частиц порошка. При этом возможны два механизма контактного взаимодействия: без отрыва исполнительного органа колебательной системы от поверхности уплотняемой массы (в этом случае элементы трущейся пары колеблются как одно целое при наличии между ними скользящего контакта) и с разрывом контакта.

При патронировании ВВ, когда давления в уплотняемом материале невелики, в характере вибрационных колебаний возникают разрывы с контактной поверхностью. В этом случае контактное взаимодействие между волноводом и прессовкой носит ударный динамический характер. Локальные давления в момент контакта могут в несколько раз превышать статические и равняться нулю между импульсами. Следовательно, только в течение некоторого промежутка времени на протяжении каждого периода гармонических колебаний сила трения будет действовать на уплотняемый материал. Результирующая сила трения в условиях динамического нагружения будет значительно меньше, чем при статическом прессовании при том же нормальном давлении, так как в первом случае время контакта является ничтожно малым. Естественно, с уменьшением продолжительности контакта сила трения снижается. В этих условиях прессования облегчается разрыв мест схватывания между поверхностью матрицы и пуансона, с одной стороны, и уплотняемым порошкообразным материалом, с другой. Таким образом, вибрационные колебания препятствуют эффекту схватывания, возникающему при статическом прессовании и приводящему к необходимости периодической чистки и смазывания пресс-инструмента. Схватывание в случае вибрационного прессования может происходить только за счет сил Ван-дер-Ваальса. Процессы диффузии и самодиффузии не успевают произойти, а чисто механические зацепления и защемления частиц материала в микронеровностях поверхности матрицы при упругих ее колебаниях значительно ослабевают.

Воздушные прослойки, возникающие между контактирующими поверхностями, при их разрыве играют не только роль смазки, но и в случае прессования сыпучих смесей, содержащих, например, металлические порошки, являются причиной образования окисных и адсорбционных пленок. Все эти факторы приводят к тому, что средняя за период колебаний сила трения уменьшается.

Факторы, влияющие на процесс вибрационного уплотнения. Известно, что на процесс виброуплотнения твердых дисперсных материалов влияют: гранулометрический состав сыпучего материала, форма частиц и состояние их поверхности, параметры вибрации (частота, амплитуда, ускорение), способ передачи вибрации перерабатываемому материалу, продолжительность вибрирования, способ загрузки сыпучего материала в вибрирующую оболочку и т. д.

Для изучения процессов виброуплотнения использовался в основном экспериментальный метод исследований, позволивший установить общие закономерности процесса и влияние на него различных факторов.

Влияние гранулометрического состава и формы частиц на процесс виброуплотнения таково. Наиболее полно изучено влияние гранулометрического состава на процесс виброуплотнения идеализированных дисперсных смесей, состоящих из сферических тел (шаров) определенного размера. При наиболее плотной регулярной укладке сфериче-

ских тел (по тетраэдру) ε = 0,259; при наиболее рыхлой (кубической, без неупорядоченных полостей) ε = 0,476; в случае часто используемых частиц округлой формы порозность укладки обычно близка к 0,40.

В работе R.C. McGeary [4] выполнены опыты по вибрационной укладке сферических частиц различного размера и в различных количественных соотношениях. Показано, что сферические частицы одинакового размера практически можно уложить с остаточной порозностью ε = 0,42 ÷ 0,38 вне зависимости от их диаметра; при теоретической плотности укладки – с порозностью ε = 0,39 ÷ 0,36. Отмечается, что плотность укладки существенно зависит от отношения диаметра оболочки $d_{об}$ к диаметру частиц $d_ч$; при $d_{об}/d_ч > 10$ плотность укладки стремится к значению порозности ε = 0,37.

Значительно увеличить плотность укладки можно, если использовать бинарную смесь, состоящую из двух фракций одинакового размера крупных сфер диаметром $d_к$ и мелких сфер диаметром $d_м$. Установлено, что плотная укладка частиц в бинарной смеси может быть получена, когда соблюдается условие фильтрации мелких сфер через каркас, образованный крупными сферами. Этому соответствует условие:

$$d_м \leq \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1\right) d_к = 0{,}154\, d_к \text{ или } d_к/d_м \geqslant 7.$$

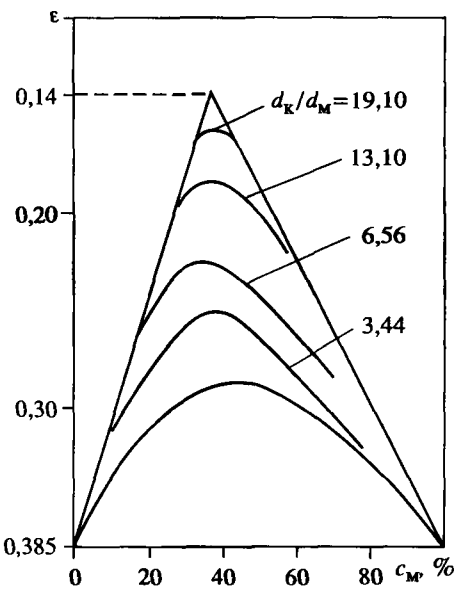


Рис. 8.17. Зависимость порозности слоя ε укладки сферических частиц двухкомпонентной смеси от массовой концентрации $c_м$ мелкой фракции

Зависимости порозности ε слоя укладки сферических частиц двухкомпонентной смеси от массовой концентрации $c_м$ мелкой фракции в смеси при различных отношениях $d_к/d_м$ представлены на рис. 8.17. Кривые на рис. 8.17 показывают, что порозность укладки ε возрастает при увеличении отношения $d_к/d_м$. Так, наиболее близкая к теоретически возможной (ε = 0,14) порозность укладки была получена при $d_к/d_м \approx 19$. Следует отметить, что с точки зрения максимальной массовой концентрации твердой фазы в слое оптимальное массовое содержание $c_м$ мелкой фракции в сме-

си лежит в пределах 25–40%; с увеличением отношения $d_к/d_м$ оптимальное содержание мелкой фракции приближается к нижнему пределу – 25%.

Для получения методом вибрационной фильтрации трехкомпонентной фракционной упаковки найдены соотношения диаметров сфер, 77 : 7 : 1 и объемов компонетнов 67 : 23 : 10. Такая трехкомпонентная система имеет минимальную теоретическую порозность укладки $\varepsilon = 0{,}065$. Экспериментально получена порозность $\varepsilon = 0{,}10$.

В работе И.Г. Шаталовой, Н.С. Горбунова, В.И.Лихтмана приведены данные вибрационной упаковки четырехкомпонентных фракционных смесей. Из этих данных следует, что при вибрационном воздействии удается получить укладку с порозностью $\varepsilon = 0{,}049$ (теоретическая минимальная плотность укладки $\varepsilon = 0{,}029$).

Однако получение высоких массовых концентраций твердой фазы в укладках порозностью $\varepsilon < 0{,}14$ на практике крайне затруднено, так как размеры частиц каждой фракции (см. гл.2) должны отличаться друг от друга приблизительно на порядок; в четырехкомпонентной фракционной смеси наибольшая сферическая частица должна быть крупнее наименьшей на 4–5 порядков.

Кроме того, большинство используемых в промышленности порошков имеют частицы несферической формы и не могут уплотняться по механизму вибропросеивания (виброфильтрации). При виброфильтрации мелкая фракция просеивается сквозь поры каркаса (скелета), образованного крупными частицами, и постепенно заполняет поровое пространство. Заполнение порового пространства скелета крупных частиц неправильной формы за счет просеивания мелкой фракции крайне затруднено, так как поры в этом случае имеют разные размеры, сложную конфигурацию, а некоторые вообще могут быть закрытыми (тупиковые поровые каналы). Поэтому при виброуплотнении многофракционных систем из несферических частиц применяют метод предварительного смешивания исходных фракций и вибрационного уплотнения приготовленной смеси.

Поскольку более мелкие частицы занимают не только поры между крупными частицами, как это бывает при вибропросеивании, но и располагаются между ними, возможная минимальная порозность двухкомпонентной фракционной смеси достигается при большем содержании мелких частиц, чем при уплотнении порошков со сферическими частицами по механизму вибропросеивания.

Экспериментальные данные виброуплотнения двухкомпонентных фракционных порошков[1] с оптимальными соотношениями фракций, но с

[1] Порошок уплотняли под действием осевой вибрации в цилиндрической оболочке диаметром 11 мм и высотой 150 мм на электромагнитном вибростенде при частоте 50 Гц, с амплитудой 0,6 мм.

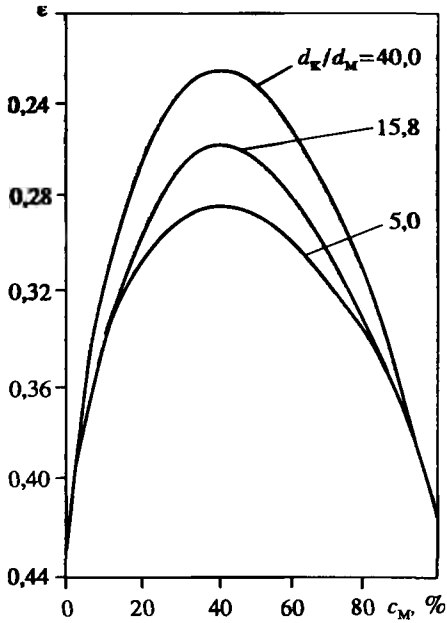


Рис. 8.18. Зависимость порозности слоя ε укладки частиц двухкомпонентной смеси карбида кремния от массовой концентрации $c_м$ мелкой фракции

частицами осколочной формы, показывают, что минимальная порозность укладки может быть получена при содержании мелкой фракции 40%.

Следует отметить, что в случае порошков со сферическими частицами с увеличением отношения средних размеров частиц смешиваемых фракций пористость укладки уменьшается. При укладке порошков с осколочной формой частиц минимальная порозность достигается при одном и том же содержании мелкой фракции (40%) и практически не зависит (или зависит незначительно) от отношения средних размеров частиц (рис. 8.18).

Из приведенных на рис. 8.18 данных видно, что двухкомпонентная смесь карбида кремния ($\rho_т$ = 3060 кг/м^3), состоящая из частиц с соотношением средних размеров частиц $d_к/d_м$ = 40, уплотняется до порозности ε = 0, 23. Для сравнения, порозность укладки монофракционных порошков со средним диаметром частиц: 0,04; 0,2; 0,63 и 0,80 мм была ниже соответственно на 18, 26, 31 и 37%.

Как видно из диаграммы виброуплотнения трехкомпонентной фракционной смеси карбида кремния (рис. 8.19), для смеси, состоящей из частиц со средними размерами частиц 1; 0,25 и 0,04 мм (имеющих насыпные плотности 1810, 1830, 1800 кг/м^3 соответственно), может быть достигнута различная плотность (меньше максимальной). Для достижения определенной плотности укладки могут быть рекомендованы несколько самых различных составов по фракционному содержанию. Максимальная плотность укладки данной тройной смеси составляла 81% теоретической плотности компактного материала, т. е. 2479 кг/м^3; это в среднем на 26% больше насыпной плотности каждой фракционной составляющей смеси.

Влияние вибрации на процесс уплотнения сыпучих материалов заключается в ослаблении или разрыве межчастичных связей, а также в увеличении подвижности частиц. Эти эффекты достигаются за счет передачи элементам структуры сыпучего материала кинетической энергии, достаточной для преодоления сил сцепления или ослабления их действия.

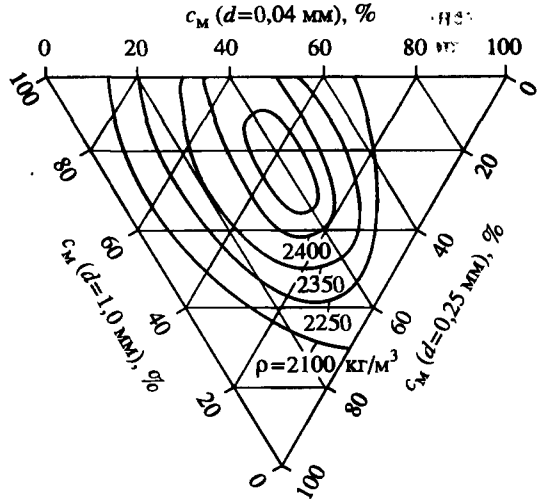


Рис. 8.19. Диаграмма плотности ρ (массовой концентрации твердой фазы) трехкомпонентной смеси карбида кремния при виброуплотнении

Кинетическая энергия, передаваемая частицам дисперсной среды, определяется большим количеством факторов (геометрия оболочки, условия закрепления оболочки с источником вибрации или вибровозбудителем и т. д.), среди которых первостепенное значение имеют частота, амплитуда, ускорение вибрации и продолжительность вибрационного воздействия.

Частота и амплитуда вибрации также влияют на процесс уплотнения сыпучих материалов. Частоты, используемые для виброуплотнения сыпучих материалов, в основном находятся в диапазоне 20–5000 Гц (механические или звуковые колебания) и диапазоне свыше 20 000 Гц (ультразвуковые колебания).

Во многих известных работах [4], посвященных исследованию влияния амплитуды и частоты колебаний на процесс уплотнения сыпучих материалов, было установлено, что частота колебаний оказывает большее влияние, чем амплитуда. Приводятся данные о существовании оптимальных частот вибрации и указаны конкретные частоты или диапазон частот, применение которых позволяет получить наилучший результат.

При механическом вибрировании наиболее часто используются частоты в диапазоне f=50 ÷ 4000 Гц и ускорениях до 50 g (здесь g – ускорение свободного падения). Эффективность варьирования частоты в определенном диапазоне обусловлена совпадением частоты вынуждающей силы с собственной частотой системы «установка – уплотняемый материал».

Также сделан вывод о большей эффективности высокочастотной вибрации. На основании экспериментальных данных было установле-

но, что эффект снижения сопротивления порошкообразного материала деформированию под воздействием упругих колебаний зависит от масштаба объекта воздействия (объема перерабатываемого материала). Для достижения равнозначной степени уплотнения различных по размерам пористых тел из одного и того же материала приходилось вводить одинаковое количество упругой энергии, приходящейся на единицу объема тела, т. е. равное количество удельной энергии упругих колебаний.

Продолжительность вибрирования оказывает следующее влияние. Установлено, что при уплотнении предварительно засыпанного сыпучего материала плотность укладки, близкая к предельной для каждого конкретного режима вибрирования (выбранных частоты и амплитуды), достигается за первые несколько секунд. Так, для карбида титана в первые 3 с наблюдается резкое повышение плотности укладки (в зависимости от гранулометрического состава до 85–90% предельной плотности укладки) и к 10–15-й секунде вибрирования уплотнение заканчивается. Дальнейшее вибрирование практически не приводит к повышению плотности укладки дисперсного материала.

Способы передачи энергии вибрации уплотняемому сыпучему материалу, как и большое расположение очага деформаций в сыпучем материале имеют важное значение при вибрационном уплотнении порошкообразных материалов. Были проанализированы различные схемы колебаний пресс-инструмента при прессовании порошкообразных материалов в замкнутой матрице, когда продольные колебания подводятся к матрице и пуансону раздельно или одновременно. Рекомендации отдельных авторов по эффективности той или иной колебательной схемы часто противоречивы. По всей видимости, это связано с недостаточно полным исследованием указанных колебательных систем, отсутствием надежных и теоретически обоснованных методов их расчета. Это приводит к различной степени точности согласования и усиления колебаний в вибрационных системах, используемых в каждом конкретном случае. Вместе с тем следует отметить, что в большинстве известных случаев вибрационного прессования порошкообразных материалов наибольший эффект по увеличению плотности и ее более равномерному распределению по объему брикета наблюдается при прессовании с наложением колебаний на матрицу и пуансон или оба пуансона одновременно.

8.4. Формование зарядов из пластичных промышленных взрывчатых веществ экструзией [2, 9]

Экструзия. Для формования изделий из пластичных композиционных ПВВ используют способ экструзии.

Экструзия – это технологический процесс, сущность которого состоит в придании материалу нужной формы в поперечном сечении путем продавливания материала через профилирующий инструмент (матрицу).

Методом экструзии из пластичных составов ВВ можно получать изделия различной формы – листы, профильные полосы, шнуры, стержни, трубы и т. д.

Основным оборудованием для переработки пластичных композиций являются одно- и многочервячные *шприц-машины* или *экструдеры*. Подробное описание конструкции экструдеров можно найти в работах [10–12].

Следует отметить, что одно- и двухчервячные экструдеры не только используют для производства изделий, но также широко применяются для смешивания, пластикации, гранулирования и других процессов в технологии переработки пластичных ВВ [9].

Современный экструдер – это машина, обеспечивающая одновременно нагрев полимерного материала за счет работы сил внутреннего трения и гомогенизацию вследствие больших деформаций сдвига, а также создающая гидростатическое давление, необходимое для непрерывного продавливания материала через профилирующий инструмент. Поэтому можно определить современный экструдер как совершенно свободный от пульсации насос, подающий термически однородную полимерную композицию с постоянной производительностью и при постоянном давлении.

Наиболее широкое применение в промышленности переработки полимеров получили одночервячные экструдеры. Аналогичным образом, наиболее разработанная область теории процессов переработки – это процессы экструзии на одночервячных машинах. Поэтому рассмотрим процессы, происходящие при экструзии с использованием одночервячного экструдера (рис. 8.20). Он имеет: цилиндрический корпус *4* с загрузочным бункером *5* для подачи гранул или кусков пластичного ВВ; червяк (шнек) *3*, установленный в подшипниковом опорном узле 6; пресс-инструмент, состоящий из конического сужающегося переходника *2* и формующей матрицы *1*, и привод. Разнообразные типы конструкций экструдеров предусматривают термостатирование внутренних полостей корпуса и формующего инструмента.

Шнек – это основной рабочий орган экструдера. Он забирает гранулы материала от загрузочного отверстия бункера, пластицирует и равномерно подает в виде гомогенной вязкотекучей массы к формующему инструменту.

По характеру процессов, протекающих на каждом участке шнека, его обычно можно разделить по длине на три основные зоны: *зона питания* или *загрузочная зона* – участок, в котором перерабатываемый материал находится в твердом состоянии; *зона сжатия* – участок, в

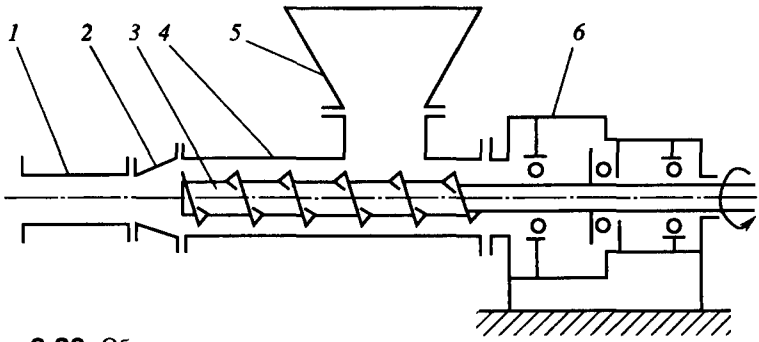


Рис. 8.20. Общая схема экструдера

котором почти полностью происходит гомогенизация материала; *дозирующая зона* – участок, в котором материал находится в вязкотекучем состоянии.

Качественный анализ работы экструдера. Принято различать экструдеры для переработки эластомеров и термопластов. Основное различие между ними заключается в том, что в первом случае питание экструдера осуществляется уже пластицированным материалом, например, поступающим в виде кусков ленты после вальцов, а во втором случае – гранулированным материалом.

В *зону питания* гранулированный материал попадает обычно при комнатной температуре. Заполнив канал, материал перемещается подобно твердому стержню. По мере продвижения вдоль канала стержень уплотняется и вследствие существования сил трения, препятствующих его движению, подвергается объемному сжатию. В отдельных случаях давление в конце этой зоны может достигать порядка 10 МПа.

Скорость перемещения пробки гранул в канале шнека зависит от соотношения между коэффициентами трения между гранулами и поверхностями шнека и корпуса. Так, чем меньше коэффициент трения между шнеком и полимером, тем быстрее материал движется по каналу. И наоборот, чем больше коэффициент трения между поверхностью корпуса и полимера, тем выше скорость движения пробки.

Для уменьшения коэффициента трения поверхность винтового канала тщательно шлифуют или полируют. Напротив, отделка внутренней поверхности корпуса определяется только соображениями удобства очистки машины. Часто на внутренней поверхности корпуса делают неглубокие продольные рифы (пазы).

Особенно большое значение имеет температурный режим работы зоны питания. Обычно выбирают температурный режим таким образом, чтобы температура внутренней стенки корпуса в зоне питания лежала в пределах 50–80 °С; это способствует повышению пластических свойств перерабатываемого материала.

Протяженность зоны питания составляет обычно порядка 4–6 диаметров шнека.

В *зоне сжатия* материал переходит из твердого состояния в вязкотекучее под воздействием тепла, подводимого от стенок корпуса, и тепла, выделяющегося в результате сдвиговых деформаций материала. Твердая пробка гранул, двигаясь по винтовому каналу шнека, испытывает *аутогезионное* (всестороннее сжимающее) воздействие за счет увеличивающегося давления, а также *когезионное* (сдвиговое) воздействие. В результате пористая структура сжатых гранул пробки приобретает свойства монолитной беспористой гомогенной массы, находящейся в вязкотекучем состоянии.

В *зоне дозирования* винтовой канал шнека оказывается заполненным полимером в вязотекучем состоянии. Начиная с этого момента, движение полимера становится подобно движению вязкой жидкости в канале винтового насоса. Фактическое движение полимера в зоне дозирования осуществляется по винтовой траектории. Это движение принято представлять как сумму двух независимых движений.

Первое – поступательное течение, представляет собой движение полимера вдоль оси винтового канала. Объемный расход этого движения определяет в конечном счете объемную производительность экструдера, и, следовательно, лимитирует скорость движения пробки гранул в пределах зон питания и плавления.

Второе циркуляционное течение, представляет собой круговое движение полимера в направлении, перпендикулярном оси винтового канала. Двигаясь поперек канала, поток встречает стенку канала и поворачивает в обратную сторону. Существующее циркуляционное течение обеспечивает гомогенизацию полимерной композиции, выравнивает распределение температур и позволяет использовать экструдер как смеситель.

Часть материала, подходящего к стенке, не поворачивает обратно, а проходит через кольцевой зазор, существующий между гребнем стенки винтового канала и внутренней поверхностью корпуса. Это – *поток утечки.* Таким образом, производительность дозирующей зоны равна разности между объемным расходом вынужденного потока и расходом утечки.

Взаимосвязь отдельных этапов экструзии показывает, что для анализа процесса надо рассматривать совокупность всех его фаз. При этом следует иметь в виду, что основным фактором, управляющим взаимодействием отдельных фаз процесса, является постоянство материального расхода полимера для любого сечения шнека.

Поскольку объемная подача (производительность) экструдера определяется работой зоны дозирования, рассмотрим метод математического описания работы этой зоны.

Расчетная модель процесса экструзии. По принципу действия дозирующая зона одночервячного экструдера является своеобразным винтовым насосом. При этом из-за высокой вязкости перекачиваемой жидкости течение в таком винтовом насосе всегда бывает ламинарным с числом Рейнольдса, близким к единице (так называемое *ползущее течение*).

Математическую модель винтового насоса можно получить в результате совместного решения системы уравнений, которые выражают законы сохранения массы, переноса импульса при ламинарном течении, с уравнениями, описывающими реологические свойства перекачиваемой жидкости (см. разд. 4.3).

Эта задача неоднократно рассматривалась в работах отечественных и зарубежных ученых. Наиболее последовательно математическая модель винтового изотермического течения ньютоновской жидкости была рассмотрена в серии работ американских авторов Карлея, Маллука и Мак-Келви, явившихся, таким образом, родоначальниками гидродинамического подхода к описанию процесса экструзии.

Рассмотрим *основные уравнения движения полимера в дозирующей зоне шнека.* При вращении шнека материал оказывается внутри механической системы, которая ограничена движущимися поверхностями тела шнека (цилиндрическое основание и боковые стороны винтового канала) и неподвижной поверхностью (поверхностью кожуха или цилиндрического корпуса); в результате в материале устанавливается вынужденный (или прямой) поток. Материал перемещается исключительно благодаря наличию этого вынужденного потока. Необходимое условие существования вынужденного потока заключается в том, что материал имеет определенную вязкость. Гипотетический материал (или жидкость) с вязкостью, равной нулю, не может транспортироваться винтовым насосом, так как в такой материальной среде не может сохраняться напряжение сдвига, а следовательно, не может возникнуть и вынужденный поток.

На рис.8.21 показаны символы, определяющие геометрию шнека и применяемые для них обозначения. Чтобы провести наиболее полный анализ, рассматривается многозаходный шнек с двумя параллельными каналами. Внутренний диаметр цилиндра $D_1 = 2R_1$, расстояние от внутреннего диаметра шнека $D_0 = 2R_0$ до поверхности цилиндра. Радиальный зазор между наружным диаметром нарезки шнека и поверхностью цилиндра c. Шаг нарезки шнека связан с углом подъема винтовой линии α, измеренным по наружному диаметру нарезки шнека, следующим соотношением:

$$E = \pi(D_1 - 2e)\,\mathrm{tg}\alpha, \tag{8.36}$$

где E – шаг нарезки шнека.

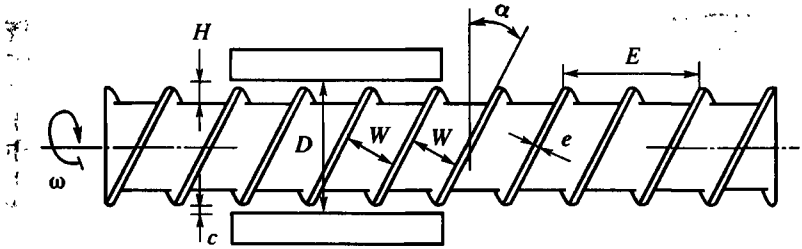


Рис. 8.21. Размеры винтового канала червяка

Если W – ширина канала, то для шнека, имеющего m заходов, можно получить следующее соотношение:

$$m(W + e) = E\cos\alpha, \tag{8.37}$$

где e – толщина витка шнека.

Для того чтобы винтовой насос работал, необходимо, чтобы шнек вращался, а цилиндр оставался неподвижным. Можно поступить и наоборот, т. е. сделать неподвижным шнек, а цилиндр заставить вращаться в противоположном направлении. В обоих случаях материал будет двигаться в одном и том же направлении и характеристики процессов будут одинаковыми. Так как конструктивно создать устройство с вращающимся шнеком проще, то машины такого типа встречаются наиболее часто.

При гидродинамическом анализе винтовых насосов необходимо детально рассмотреть траекторию частицы[1] материала в винтовом канале относительно неподвижной системы координат. Система координат выбирается произвольно. Имеются две возможности определения положения частицы материала: либо по отношению к цилиндру, либо по отношению к шнеку.

В дальнейшем будем определять положение частицы материала по отношению к шнеку. Для этого шнек будет считаться неподвижным, а цилиндр вращающимся, т. е. используем принцип *обращения движения.*

Используем чрезвычайно полезное для гидродинамического анализа винтовых насосов упрощение, представив винтовой канал в виде двух параллельных плоскостей. Для этого винтовой канал шнека условно развернут, и представляет собой канал в виде неподвижного прямоугольного желоба с подвижной верхней плоскостью (рис. 8.22) – развертка поверхности корпуса (внешнего цилиндра). Ось z – ось вин-

[1] Под частицей в феноменологическом аспекте понимается материальная точка сплошной среды, движущейся в канале шнека.

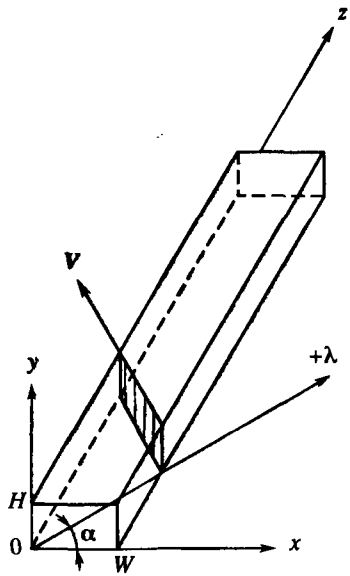


Рис. 8.22. Расчетная схема экструзии в зоне дозирования

тового канала; за положительное направление этой оси принимается направление движения материала к выходу из канала; длина канала равна Z. Ширина поперечного сечения канала (ширина винтовой нарезки), расположенного перпендикулярно оси z, обозначена через W, а его высота через H. Ось λ, направленная параллельно продольной оси шнека, имеет общую длину L и наклонена к оси x под углом α подъема винтовой линии шнека. Заштрихованное поперечное сечение расположено в плоскости, перпендикулярной оси λ. Для материала, перемещающегося от загрузочного бункера к выходу из шнека, это сечение должно двигаться в направлении +λ.

Вектор скорости материала в любой точке винтового канала можно разложить на компоненты v_x, v_y, v_z, которые действуют в направлении, параллельном соответствующим осям прямоугольной системы координат.

Верхняя плоскость канала, в котором движется материал, представляет собой поверхность цилиндра радиуса R_1; она движется с постоянной скоростью параллельно плоскости $x - y$ на расстоянии H от нее. Движение этой плоскости описывается вектором скорости V, который направлен перпендикулярно оси λ. Модуль этого вектора равняется линейной скорости вращения поверхности цилиндра

$$V = \omega R_1, \tag{8.38}$$

где ω – угловая частота вращения шнека.

Вектор переносной скорости V можно разложить на две компоненты V_1, V_2, направленные соответственно вдоль осей z и x, как показано на рис. 8.23. Их значения

$$V_1 = \omega R_1 \cos\alpha; \quad V_2 = \omega R_1 \sin\alpha, \tag{8.39}$$

Скорость V_1 вызывает вынужденный (прямой поток) материала в винтовом канале шнека; скорость V_2 – циркуляционное движение ма-

териала в поперечном сечении канала.

Предложенная плоскопараллельная модель работы цилиндрического винтового насоса обычно используется, когда отношение $(H/D)_1$ невелико, поскольку вносимая ошибка также будет небольшой. Теоретический анализ, приведенный в работе [11], и экспериментальные исследования работы винтовых насосов во многих случаях подтверждают этот вывод.

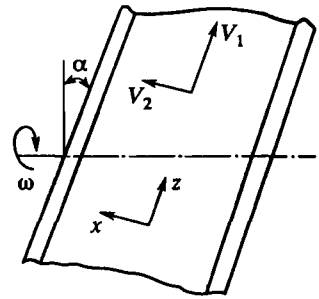


Рис. 8.23. Диаграмма скоростей

Таким образом, любая частица материала при своем движении (начиная с загрузочного отверстия при $z = 0$) вдоль винтового канала проходит достаточно сложный путь. Чрезвычайно трудно дать полное математическое описание ее движения. Вместе с тем для расчета расхода (производительности) шнекового устройства совсем необязательно давать полное описание движения частиц в винтовом канале.

Объемный расход Q можно получить интегрированием уравнения

$$Q = \int_0^H \int_0^W v_z dx dy. \tag{8.40}$$

Для установившегося изотермического течения несжимаемой (ρ = const) ньютоновской жидкости уравнение неразрывности (4.4) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \tag{8.41}$$

При движении полимера вдоль оси z будем считать, что $v_x = v_y \equiv 0$, так как $v_x << v_z$ и $v_y << v_z$. Тогда из уравнения (8.41) следует, что v_z может являться функцией только координат x и y, т. е. $v_z(x,y)$.

Используя уравнения Навье–Стокса (6.1), движение материала вдоль плоского канала можно записать в следующем виде:

$$v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) + \nu\left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right). \tag{8.42}$$

Члены левой части уравнения (8.42) представляют собой ускорение, которым в случае медленного течения можно пренебречь. Более

того, если у шнека отношение H/W невелико (строго говоря, $H/W << 1$), то v_2 мало зависит от x, так что производной $\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2}$ по сравнению с производной $\frac{\partial_x^2 v_z}{\partial y^2}$ можно пренебречь. В этом случае уравнение (8.42) можно записать в следущем виде:

$$\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)=\frac{\partial^2 v_z^2}{\partial y^2}. \tag{8.43}$$

Если предположить, что зазор между наружным диаметром нарезки шнека и поверхностью цилиндра отсутствует, то граничные условия для однозаходного шнека ($m = 1$) будут следующие: $v_z = V_1$ (при $y = H$) и $v_z = 0$ (при $y = 0$).

В предположении, что в поперечном сечении канала давление меняется незначительно, т. е. решение уравнения (8.43), удовлетворяющее рассмотренным граничным условиям, можно записать в следующем виде:

$$v_z = V_1 \frac{y}{H} - \frac{y(H-y)}{2\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right). \tag{8.44}$$

Из совместного решения уравнений (8.40) и (8.44) находим объемный расход

$$Q = V_1 \frac{WH}{2} - \frac{WH^3}{12\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right). \tag{8.45}$$

Первое слагаемое в уравнении (8.45) характеризует вынужденный поток Q_1 за счет вращения шнека; второе слагаемое характеризует обратный поток Q_2 за счет давления, создаваемого формующим пресс-инструментом.

Проанализируем влияние радиального зазора. Большинство экструдеров имеют определенный хотя и довольно небольшой зазор между наружным диаметром винтовой нарезки и поверхностью цилиндра. Благодаря существованию радиального зазора появляется возможность «утечки» некоторого количества материала в обратном направлении его транспортирования, что в конечном итоге снижает производительность шнекового устройства.

Гор и Мак-Келви предположили, что формула для вынужденного потока должна содержать в себе коэффициент $\left(1-\frac{c}{H}\right)^2$, учитываю-

щий потери в вынужденном потоке, возникающие вследствие наличия зазора. Этот коэффициент вводится на том основании, что при наличии зазора эффективная область, в которой действует вынужденный поток, будет простираться не до поверхности цилиндра, где $y = H$, а от внутреннего диаметра нарезки шнека до точки $(H - c)$. В этом случае объемный расход вынужденного потока

$$Q_в = Q_1\left(1 - \frac{c}{H}\right)^2. \tag{8.46}$$

Поправочный коэффициент для расхода потока под давлением при наличии зазора

$$Q_д = Q_2\left[1 + \left(\frac{c}{H}\right)^3\left(\frac{W}{e}\right)\left(\frac{1}{\sin\alpha\cos\alpha}\right)^2\right]. \tag{8.47}$$

Получим гидродинамическую характеристику шнека. С учетом уравнений (8.46) и (8.47) и, обобщая результаты таким образом, чтобы их можно было применить к шнеку, имеющему m заходов, из уравнения (8.45) с учетом, что для несжимаемого материала Q не зависит от z, получим:

$$Q = aN - \frac{b}{\mu}\Delta p, \tag{8.48}$$

где N – скорость вращения шнека; Δp – перепад давления вдоль винтового канала длиной Z.

Здесь $$a = \frac{\pi^2 D^2 H \sin\alpha\cos\alpha}{2}\left[1 - \frac{2c}{D_1} - \frac{me}{\pi D_1 \sin\alpha}\right]\left[1 - \frac{c}{H}\right]^2;$$

$$b = \frac{\pi D_1 H^3 \sin^2\alpha}{12Z}\left[1 - \frac{2c}{D_1} - \frac{me}{\pi D_1 \sin\alpha}\right]\left[1 + 2\left(\frac{c}{H}\right)^3\left(\frac{W}{e}\right)\frac{1}{\sin 2\alpha}\right];$$

Уравнение (8.48) называется гидродинамической характеристикой шнека.

Определим гидродинамическую характеристику формующего пресс-инструмента. По выходе из шнека материал проходит через формующее устройство (пресс-инструмент). Если материал сохраняет свойства ньютоновской жидкости, то объемный расход и падение давления связаны между собой соотношением следующего вида:

$$Q = \frac{K}{\mu}\Delta p, \tag{8.49}$$

где K – постоянный показатель, зависящий от геометрии формующего пресс-инструмента экструдера.

Перепад давления Δp в уравнении (8.49) имеет то же значение, что и в уравнении (8.48), при условии, что давления на входе в шнек и на выходе из выходного устройства равны.

В заключение определяем объемную производительность экструдера. Из совместного решении уравнения (8.48) – характеристики шнека и уравнения (8.49) – характеристики формующего пресс-инструмента относительно Δp получим следующее выражение для определения объемного расхода перерабатываемого материала в экструдере:

$$Q = \frac{aK}{b+K} N. \qquad (8.50)$$

Уравнение (8.50) показывает, что объемный расход прямо пропорционален скорости вращения шнека. Но не следует забывать, что этот вывод справедлив только в частном случае, когда реологические свойства перерабатываемого материала аналогичны течению ньютоновской жидкости в изотермических условиях.

Расчеты технологических параметров экструдеров с учетом неньютоновских реологических свойств перерабатываемых полимеров и неизотермических процессов теплообмена требуют значительно более сложных математических решений. С ними читатель может ознакомиться, например, в работах [11, 12].

8.5. Формование зарядов детонирующих шнуров [1, 9]

Детонирующие шнуры (ДШ) общего назначения. Детонирующие шнуры представляют собой гибкие удлиненные устройства, состоящие из сердцевины мощного бризантного ВВ (тэн, гексоген), безотказно детонирующего в удлиненном заряде малого диаметра, нескольких оплеток из хлопчатобумажной или синтетической пряжи с влагоизолирующим наружным покрытием. Широко используются ДШ с оболочкой из полиэтиленовой композиции или пластиката [1].

Выпускаемые ДШ различаются между собой по мощности, морозо- и водостойкости, а также по другим эксплуатационным показателям. Детонационный шнур марки ДШ-А (рис. 8.24, *а*) состоит из водоизолирующего покрытия *1*, *2*, *8*, первой *4*, второй *3* и третьей *7* обмоток, ведущих нитей *5* и сердцевины ВВ *6*.

Детонационный шнур ДШЭ-12 (рис. 8.24, *б*) состоит из колпачка *1*, полиэтиленовой оболочки *2*, продольных нитей *3* и сердцевины *4*. Буква «Э» в обозначении марки ДШ указывает, что пластикатная оболоч-

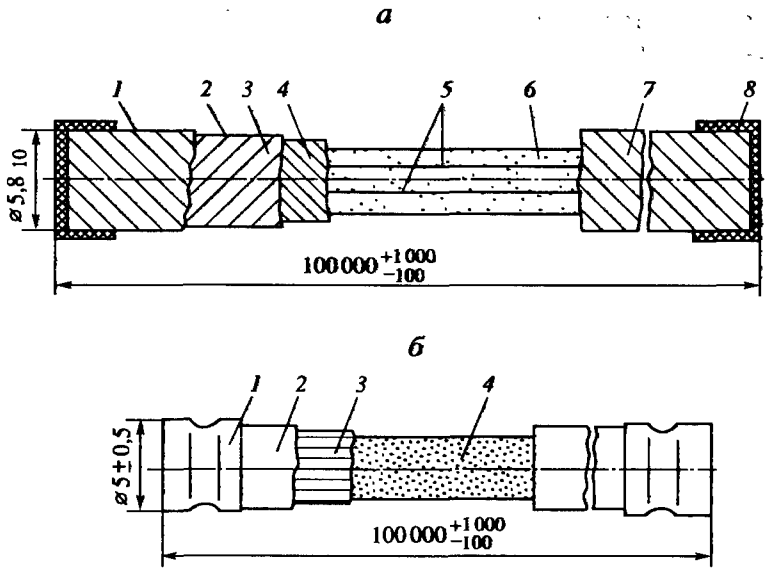


Рис. 8.24. Детонирующие шнур марок ДШ-А (*а*) и ДШЭ-12 (*б*)

ка нанесена методом экструзии. Эти шнуры принято называть экструзионными.

Масса ВВ сердцевины изменяется от 5–6,6 г на 1 м длины (шнур ДШЭ-6) до 17–53 г на 1 м (шнур ДШЭ-50); она формуется в процессе протягивания сыпучего ВВ в нитяной оплетке через сужающую фильеру. Такой способ компактирования сыпучего материала получил название *волочение*.

Особенности процесса волочения таковы (рис. 8.25, *а*). В процессе волочения сыпучий материал *1* поступает в сужающуюся калибрующую фильеру (волоку) *2*, где за счет принудительного увлекающего движения наружной оболочки *3* происходит его компактирование до нужной плотности и геометрических размеров.

Под действием силы *F*, приложенной к переднему концу оболочки, а также нормальных и касательных напряжений, возникающих на контактной поверхности между сыпучим материалом и обрамляющей его оболочкой, в объеме сыпучего материала возникают сжимающие напряжения и соответствующие им деформации. В результате вдоль калибрующей фильеры существенно изменяются плотность и физико-механические свойства материала: из насыпного состояния он превращается в компактное пористое тело.

Конечная плотность пористой сердцевины шнура, усилие и возникающие напряжения при волочении зависят от физико-механических

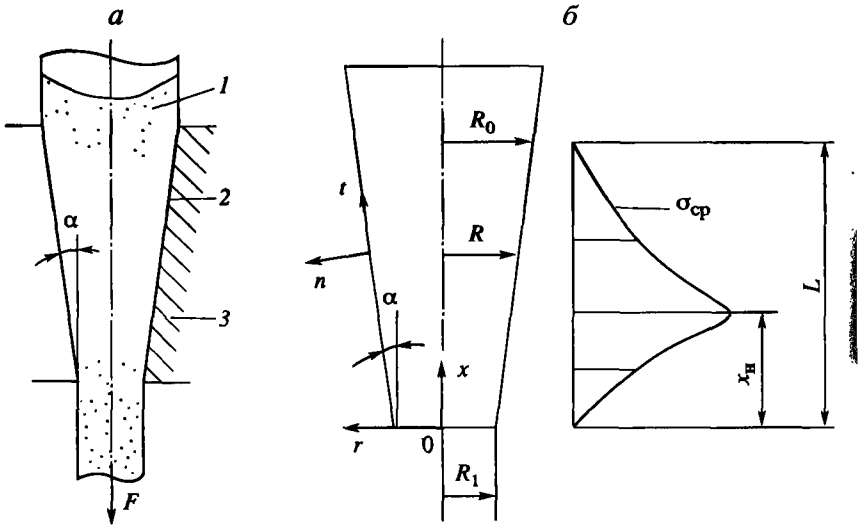


Рис. 8.25. Принципиальная (*а*) и расчетная (*б*) схемы процесса волочения сыпучего материала

и реологических свойств сыпучего материала, геометрических размеров фильеры, скорости деформации (скорости волочения) и др.

В зависимости от напряженно-деформированного состояния сыпучего материала в процессе волочения можно выделить три зоны: неконтактную зону подачи сыпучего вещества; контактную зону (очага деформации) вдоль рабочего участка канала фильеры; неконтактную зону приемки шнурового изделия.

Основные деформации сыпучего материала, возникающие в контактной зоне, влияют на напряжения и соответствующие им деформации материала в неконтактных зонах. Однако они довольно быстро уменьшаются по мере удаления от сечений входа и выхода перерабатываемого материала в рабочий канал фильеры.

В процессе волочения вдоль очага контактных деформаций можно условно выделить два участка: нагружения (уплотнения) и разгружения (выдавливания) в соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 8.25, *б*.

В зоне уплотнения ($x_н \le x \le L$), начиная с $x = L$, происходит процесс активного нагружения сыпучего материала; за счет объемного деформирования изменяется его плотность от насыпной плотности $\rho_н$ до конечной плотности $\rho_{из}$. Окончательная плотность шнура достигается в нейтральном сечении, после чего остается постоянной.

В нейтральном сечении ($x = x_н$) давление в уплотняемом материале достигает максимальной величины, а контактные напряжения внешнего трения изменяют знак.

В зоне выдавливания ($0 \le x \le x_н$) после прохождения нейтрального сечения плотность остается неизменной. В этой зоне собственно процесса компактирования не происходит, и процесс напоминает скорее выдавливание материала в узкую щель. При этом деформирование происходит в условиях силового разгружения материала.

В начальной точке диаграммы давлений плотность порошка отвечает некоторой начальной плотности $\rho_н$, близкой к насыпной плотности, а в точке максимума – окончательной плотности изделия ρ.

Протяженность очага деформации материала (протяженность зон уплотнения и выдавливания) зависит от реологических и физико-механических свойств перерабатываемого материала, геометрических размеров клинового канала, кинематических факторов процесса компактирования, влияние которых экспериментально исследовано в работах Г.Г. Сагидуллина.

Определение силовых факторов при волочении. При решении осесимметричной задачи напряженно-деформированного состояния сыпучего материала при волочении и определении контактных давлений на поверхности круговой конической фильеры рассмотрим напряженно-деформированные состояния сыпучего материала отдельно для участков нагружения (уплотнения) и разгружения (выдавливания) с последующей сшивкой полученных решений в нейтральном сечении очага деформаций рабочего канала фильеры.

Распределение напряжений в зоне уплотнения таково. Для осесимметричной задачи волочения в круглом прямом конусе при изотермических условиях без учета массовых и инерционных сил уравнения равновесия в цилиндрической системе координат (x, r, θ) запишутся:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xr}}{\partial r} + \frac{\tau_{xr}}{r} = 0, \tag{8.51}$$

$$\frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \tag{8.52}$$

где σ_x, σ_r, σ_θ — нормальные напряжения; τ_{xr}, τ_{rx} — касательные напряжения; $\tau_{xr} = \tau_{rx} = \tau$.

При активном нагружении сыпучих материалов давлением реологические уравнения, устанавливающие связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций, могут быть представлены в следующем виде:

$$\sigma_x = \sigma_{ср} + 2G\left(\frac{\partial U_x}{\partial x} - \frac{\varepsilon_V}{3}\right), \quad (8.53)$$

$$\sigma_r = \sigma_{ср} = 2G\left(\frac{\partial U_r}{\partial r} - \frac{\varepsilon_V}{3}\right), \quad (8.54)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_{ср} + 2G\left(\frac{U_r}{r} - \frac{\varepsilon_V}{3}\right), \quad (8.55)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau = G\left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x}\right), \quad (8.56)$$

где G – переменный модуль сдвига, зависящий от плотности материала ρ; $\sigma_{ср}$ – среднее нормальное напряжение; $\sigma_{ср} = \frac{\sigma_x + \sigma_r + \sigma_\theta}{3}$; U_x, U_r – компоненты вектора смещения; ε_V – отнсительное изменение объема; $\varepsilon_V = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_r}{r}$.

При волочении основное смещение сыпучего материала происходит вдоль продольной координаты x, когда $\frac{\partial U_x}{\partial r} >> \frac{\partial U_r}{\partial x}$; $\frac{\partial U_x}{\partial r} >> \frac{\partial U_x}{\partial x}$ и плотность $\rho = \rho(x)$, т. е. $\frac{\partial \rho}{\partial r} = 0$.

При таком приближении уравнения (8.51)–(8.56) принимают следующий вид:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial \sigma_{ср}}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\tau}{r} = 0, \\ &\frac{\partial \sigma_{ср}}{\partial r} = 0 \end{aligned}\right\}. \quad (8.57)$$

Здесь $\tau = \tau_{rx} = \tau_{xr} = G\frac{\partial U_x}{\partial r}$.

Будем считать, что на стенке конуса ($r = R$) между порошкообразным материалом и поверхностью нитей, протягиваемых силой F, возникают нормальные σ_{nn} и касательные τ_{nt} контактные напряжения, которые определяются следующим граничным условием:

$$\tau_{nt} = f_{тр}\sigma_{nn} + k(\sigma_{ср}), \quad (8.58)$$

где $f_{тр}$ – среднее вдоль зоны уплотнения $x_н \le x \le L$ (здесь L – высота конической фильеры) значение коэффициента внешнего трения скольжения сыпучего материала по поверхности, образованной нитями; $k(\sigma_{ср})$ – параметр адгезионного сцепления.

Функциональная зависимость параметра адгезионного сцепления от среднего нормального напряжения $k(\sigma_{ср})$ была рассмотрена ранее (см. подразд. 2.5) и определяется уравнением (2.17).

Из решения первого уравнения системы (8.57) с учетом условия симметрии, что при $r = 0$ касательное напряжение $\tau = 0$, для его определения получим

$$\tau = -\frac{1}{2}\frac{d\sigma_{ср}}{dx} r. \qquad (8.59)$$

На участке уплотнения ($x_н \le x \le L$) производная $\dfrac{d\sigma_{ср}}{dx} < 0$;

касательные напряжения $\tau > 0$. На участке выдавливания ($0 \le x < x_н$) производная $\dfrac{d\sigma_{ср}}{dx} > 0$; касательные напряжения $\tau < 0$. В нейтральном сечении при $x = x_н$ производная $\dfrac{d\sigma_{ср}}{dx} = 0$; в этом сечении касательные напряжения меняют знак на противоположный.

Выразим значения контактных напряжений τ_{nt} и σ_{nn} через компоненты системы координат xr (см. рис. 8.25, *б*):

$$\sigma_{nn} = \sigma_r \cos^2\alpha + \sigma_x \sin^2\alpha - 2\tau_{xr} \sin\alpha \cos\alpha,$$

$$\tau_{nt} = (\sigma_r - \sigma_x) \sin\alpha \cos\alpha + \tau_{xr} (\cos^2\alpha - \sin^2\alpha).$$

При компактировании сыпучих материалов волочением угол α наклона образующей конуса с вертикальной осью x обычно составляет порядка 10–15° (не более). Для указанных значений угла α уравнения для контактных напряжений σ_{nn} и τ_{nt} приближенно можно представить как

$$\sigma_{nn} \equiv \sigma_r \cos^2\alpha; \quad \tau_{nt} \equiv \tau_{xr} \cos^2\alpha. \qquad (8.60)$$

С учетом, что $\varepsilon_V = \sigma_{ср}/E_{сж}$ ($E_{сж}$ – модуль объемного сжатия, зависящий от плотности сыпучего материала), представим уравнение (8.54) в следующем виде:

$$\sigma_r = (1 - \lambda)\sigma_{ср} + 2G\varepsilon_r \qquad (8.61)$$

Здесь $\lambda = \dfrac{2G}{3E_{сж}}$; $\varepsilon_r = \dfrac{\partial U_r}{\partial r} \approx \dfrac{\Delta U_r}{R_0} = \dfrac{(L-x)\mathrm{tg}\alpha}{R_1 + L\mathrm{tg}\alpha}$.

Поскольку с ростом плотности сыпучего материала увеличивается как модуль сдвига, так и модуль объемного сжатия, то их отношение, выраженное через коэффициент λ, можно в первом приближении считать величиной постоянной. Как показали эксперименты [4], $\lambda < 1$; для ряда сыпучих материалов $\lambda = 0{,}19 \div 0{,}46$.

Решение задачи по определению силы волочения сыпучего материала через коническую фильеру можно значительно упростить, если в зоне уплотнения конического канала модуль сдвига условно считать величиной постоянной, придав ему некоторое среднее значение $G_{ср}(\rho_{ср})$, соответствующее средней плотности материала $\rho_{ср}$.

Предполагая, что при волочении плотность сыпучего материала возрастает пропорционально уменьшению площади поперечного сечения фильеры, получим:

$$\rho = \rho_н \frac{R_0^2}{R^2},\ R_н \le R \le R_0, \tag{8.62}$$

где ρ – плотность материала в сечении $R(x)$ конического канала, $\rho_н$ – насыпная плотность; $R_н$ – радиус фильеры при $x = x_н$.

Средняя интегральная плотность по длине зоны уплотнения

$$\rho_{ср} = \frac{\int_{R_н}^{R_0} \rho_н \frac{R_0^2}{R^2} dR}{R_0 - R_н} = \rho_н \frac{R_0}{R_н}. \tag{8.63}$$

Из экспериментальной зависимости $G - \rho$ по средней плотности $\rho_{ср}$ определяется значение $G_{ср}$.

В результате выражение для нормального радиального напряжения запишется:

$$\sigma_r = (1-\lambda)\sigma_{ср} + 2G_{ср}\frac{R_0 - R}{R_0}. \tag{8.64}$$

Из совместного решения уравнений (8.58)–(8.60) и (8.64) получим следующее уравнение для определения среднего нормального напряжения $\sigma_{ср}$:

$$\frac{d\sigma_{ср}}{dx} + \frac{a}{R}\sigma_{ср} + \frac{b\,(L-x)}{R} + \frac{k_0}{R} = 0, \tag{8.65}$$

где $a = 2(1-\lambda)f_{тр} + \frac{2k_1}{\cos^2\alpha}$; $b = \frac{4f_т G_{ср} \operatorname{tg}\alpha}{R_0}$.

Решением уравнения (8.65) для $k_0 = 0$ с учетом, что при $R = R_0$ $\sigma_{ср} = 0$, будет

$$\sigma_{ср} = \frac{4f_{тр}G_{ср}}{a(c+1)}\left[\left(\frac{R_0}{R}\right)^c - 1 - c\left(\frac{R_0 - R}{R_0}\right)\right]. \qquad (8.66)$$

Здесь $c = \frac{a}{\operatorname{tg}\alpha}$.

Распределение напряжений в зоне выдавливания получаем следующим образом. Для сыпучих материалов при различной степени их компактирования кривые нагружения и разгружения не совпадают друг с другом [4]. Поэтому для зоны выдавливания, где происходит процесс разгружения пористого тела, не представляется возможным использовать реологические уравнения нелинейной упругости и пластичности в форме выражений (8.53)–(8.56). При решении задачи на участке выдавливания ($0 \le x \le x_н$) воспользуемся только представлениями, которые можно выразить в напряжениях.

В зоне выдавливания плотность материала, достигнув наибольшего значения для данных условий процесса компактирования в нейтральном сечении ($x = x_н$), где среднее нормальное напряжение $\sigma_{ср}$ достигает своего максимального значения $\sigma_{ср}^{max}$, остается неизменной.

Граничное условие при $r = R$ запишется следующим образом

$$\tau_{nl} = -(f_{тр}\sigma_{nn} + k) = -(f_{тр}\sigma_r \cos^2\alpha + k). \qquad (8.67)$$

Соотношение между нормальными напряжениями σ_x, σ_r и σ_θ найдем из линеализированных уравнений предельного состояния (см. подразд. 2.5); согласно [4] для осесимметричного напряженного состояния, когда $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_2 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_x$, в следующем виде:

$$\sigma_r - \sigma_x = (\sigma_r + \sigma_x + 2k \operatorname{ctg}\varphi)\sin\varphi, \qquad (8.68)$$

$$\sigma_\theta - \sigma_x = (\sigma_\theta + \sigma_x + 2k \operatorname{ctg}\varphi)\sin\varphi. \qquad (8.69)$$

Из совместного решения уравнений (8.57), (8.60), (8.67)–(8.69) с учетом,что $\sigma_{ср} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$, получим следующее уравнение для определения нормального напряжения σ_r:

$$\frac{d\sigma_r}{dx} - \frac{\beta}{R}\sigma_r - \frac{\gamma}{R}k = 0. \qquad (8.70)$$

Здесь $\beta = \dfrac{6(1+\sin\varphi)f_т}{3+\sin\varphi}$; $\gamma = \dfrac{6(1+\sin\varphi)}{(3+\sin\varphi)\cos^2\alpha}$.

Решением уравнения (8.70) с учетом граничного условия, что при $R = R_1$ $\sigma_r = 0$, будет:

$$\sigma_r = \frac{k}{f_{тр}\cos^2\alpha}\left[\left(\frac{R}{R_1}\right)^i - 1\right]. \qquad (8.71)$$

Здесь $i = \dfrac{6f_{тр}(1+\sin\varphi)}{(3+\sin\varphi)\mathrm{tg}\alpha}$.

Из совместного решения уравнений (8.67) и (8.71) значения контактных напряжений на поверхности конуса в зоне выдавливания найдем как:

$$\sigma_{nn} = \frac{k}{f_{тр}}\left[\left(\frac{R}{R_1}\right)^i - 1\right], \qquad (8.72)$$

и

$$\tau_{nt} = -\left(\frac{R}{R_1}\right)^i. \qquad (8.73)$$

Здесь $R_1 \le R \le R_н$.

Полученные теоретические зависимости позволяют построить эпюру нормального напряжения (давления) σ_r вдоль зон уплотнения и выдавливания.

Задаваясь значениями координаты x, строим эпюру $\sigma_r(x)$ для участка уплотнения (нагружения) с помощью выражений (8.64) и (8.66) и для участка выдавливания (разгружения) по уравнению (8.71).

Пересечение этих эпюр дает значение осевой координаты нейтрального сечения ($x = x_н$) эпюры нормального давления σ_r.

Усилие волочения. Интегральное значение осевой силы вытяжки (волочения) F, приложенной к нитям с окончательно уплотненным материалом за выходным сечением конической фильеры (см. рис. 8.25, *а*), найдем как

$$F = 2\pi\left(1 + f_{тр}\operatorname{ctg}\alpha\right)\left[\int_{R_н}^{R_0} \sigma_{nn}^{(1)} R dR + \int_{R_1}^{R_н} \sigma_{nn}^{(2)} R dR\right], \tag{8.74}$$

где $\sigma_{nn}^{(1)}$ – значение нормального напряжения σ_{nn} в зоне уплотнения ($R_н \le R \le R_0$), определяемое выражениями (8.60), (8.64) и (8.66); $\sigma_{nn}^{(2)}$ – то же в зоне выдавливания, определяемое выражением (8.72).

В результате интегрирования уравнения (8.74) получим:

$$F = 2\pi R_0^2\left(1 + f_{тр}\operatorname{ctg}\alpha\right)G_{ср}\left\{\frac{4f_{тр}\cos^2\alpha}{a(c+1)}\left[\frac{1-\left(\frac{R_н}{R_0}\right)^{2-c}}{2-c} + c\,\frac{1-\left(\frac{R_н}{R_0}\right)^{3}}{3} + (c-1)\frac{1-\left(\frac{R_н}{R_0}\right)^{2}}{2}\right] + \cos^2\alpha\left[1-\left(\frac{R_н}{R_0}\right)^{2} - 2\frac{1-\left(\frac{R_н}{R_0}\right)^{3}}{3}\right] + \frac{k}{f_{тр}G_{ср}}\left(\frac{R_1}{R_0}\right)^{2}\left[\frac{\left(\frac{R_н}{R_1}\right)^{i+2}-1}{i+2} - \frac{\left(\frac{R_н}{R_1}\right)^{2}-1}{2}\right]\right\}. \tag{8.75}$$

Для расчета усилия волочения с помощью уравнения (8.75) могут быть использованы методы вычисления на ЭВМ.

Литература

1. *Щукин Ю.Г., Лютиков Г.Г., Поздняков З.Г.* Средства инициирования промышленных взрывчатых веществ: Учеб. для техникумов. – М.: Недра, 1996. – 155 с.

2. Безопасность при взрывных работах: Сб. документов. Сер. 13. Вып. 1/Колл. авт.– М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора в промышленности России», 2001. – 244 с.

3. Промышленные взрывчатые вещества на основе утилизируемых боеприпасов: Учеб. пособие для вузов/Под общ. ред. Ю.Г. Щукина. – М.: Недра, 1998. – 319 с.

4. *Генералов М.Б.* Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: Учеб. пособие для вузов. – Калуга: Изд-во

Н. Бочковой, 2002. – 592 с.

5. *Кунин Н.Ф., Юрченко Б.Д.* Механические свойства взрывчатых веществ. – М.: Дом техники Министерства общего машиностроения СССР, 1956. – 145 с.

6. *Кунин Н.Ф., Юрченко Б.Д.* Прессование взрывчатых веществ. – М.: Дом техники министерства общего машиностроения СССР, 1957. – 119 с.

7. *Поздняков З.Г., Росси Б.Д.* Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания. – М.: Недра, 1977. – 253 с.

8. *Кунин Н.Ф., Юрченко Б.Д.* Шнекование взрывчатых веществ. – М.: Дом техники Министерства общего машиностроения СССР, 1957. – 159 с.

9. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период/Под ред. Н.Г. Пузырева. – СПб.: Гуманистик, 2001. – 928 с.

10. *Шенкель Г.* Шнековые прессы для пластмасс. – Л.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит., 1962. – 467 с.

11. *Мак-Келви Д.М.* Переработка полимеров. – М.: Химия, 1965. – 442 с.

12. *Торнер Р.В.* Основные процессы переработки полимеров. – М.: Химия. – 453 с.

ГЛАВА 9

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ УТИЛИЗИРОВАННЫХ БОЕПРИПАСОВ

9.1. Особенности технологии расснаряжения боеприпасов [1]

Общие сведения. В настоящее время скопилось десятки тысяч вагонов боеприпасов, технически непригодных или запрещенных к боевому применению. Вооруженным силам не требуются огромные запасы боеприпасов, которые были накоплены в предыдущие годы. Поэтому весьма актуальной стала проблема утилизации боеприпасов с использованием их в народном хозяйстве.

Назрела необходимость подходить к этой проблеме с позиции применения взрывчатых элементов, извлеченных из боеприпасов, в качестве промышленных взрывчатых материалов. Это позволит сократить дефицит в водостойких ПВВ, а также уменьшить запасы устаревших боеприпасов, опасных для дальнейшего хранения и экологически вредных для уничтожения.

Отечественными и зарубежными специализированными предприятиями уже накоплен положительный опыт промышленного применения взрывчатых материалов из утилизированных боеприпасов различного назначения (авиационных, артиллерийских, инженерных и др.) [1].

Под *методами расснаряжения боеприпасов* понимают методы извлечения из них элементов взрывчатых веществ с последующей утилизацией как ВВ, так и элементов корпусов.

Технологии расснаряжения боеприпасов имеют определенную специфику, которую следует обязательно учитывать при проведении работ. Во-первых, в боеприпасах используются чувствительные к механическим и тепловым воздействиям вещества, представляющие собой значительную потенциальную взрывоопасность. Случайный взрыв одного снаряда в месте, где сосредоточены их значительные запасы, во многих случаях приводит к трагическим последствиям. Во-вторых, подлежащие утилизации боеприпасы, как правило, представляют собой неразъемную конструкцию, изначально не предполагаемую для демонтажа и, следовательно, для извлечения заполненных продуктов.

В-третьих, необходима раздельная утилизация, например металлической составляющей боеприпаса, и значительной доли взрывчатых веществ, порохов, твердых ракетных топлив, отравляющих веществ и т. д.

Технология расснаряжения боеприпаса. В большинстве случаев расснаряжение боеприпасов предполагает выполнение следующих типовых операций: удаление взрывателя, вскрытие корпуса для доступа к взрывчатому веществу, извлечение взрывчатого материала, последующая переработка элементов корпуса и ВВ.

Удаление и расснаряжение взрывателя также предполагают вскрытие корпуса, извлечение инициирующего ВВ, последующую утилизацию корпуса и взрывчатого вещества.

В настоящее время практически нет универсального способа расснаряжения боеприпасов. Это связано с большим разнообразием конструкций боеприпасов, взрывателей, а также широкой рецептурой штатных бризантных ВВ, используемых для целей снаряжения и отличающихся своими физико-химическими и механическими свойствами.

Удаление взрывателя из корпуса боеприпаса осуществляют: вывинчиванием его из корпуса средствами механизации или автоматизации; отделением встроенных взрывателей; применением кумулятивных зарядов, пиротехнических составов для термической резки; использованием ультразвуковых или гидродинамических резаков; обычной механической резкой на станках.

Вскрытие корпуса боеприпаса для осуществления доступа к взрывчатому веществу может осуществляться следующими средствами и способами [1]:

- гидравлической резкой;
- взрывной резкой кумулятивными струями;
- ультразвуковой резкой;
- прожиганием корпуса продуктами сгорания пиротехнических составов (термической резкой);
- разрушением корпуса в химически активной среде;
- механическим резанием (фрезерованием, сверлением) лезвием (резцом) на металлообрабатывающих станках;
- электрохимическим растворением (травлением);
- воздействием лазерного луча.

Извлечение взрывчатого материала из корпусов боеприпасов или их элементов может осуществляться следующими способами [1]:

- выплавлением;
- вымыванием струей жидкости;
- выбиванием с помощью механических средств;
- импульсным способом (нагружением импульсом ударной волны);
- механическим вытачиванием;
- магнитодинамическим воздействием на корпус;
- растворением в химических средах;

- воздействием сверхнизких (криогенных) температур.

Технологический процесс извлечения взрывчатых веществ из каморы боеприпаса является наиболее опасным и сложным с точки зрения обеспечения специальным оборудованием и осуществления технологического процесса. Выбор способа извлечения ВВ из корпуса зависит от многих факторов, например, состава взрывчатого материала и его свойств, подготовки утилизируемого взрывчатого вещества к дальнейшей переработке, выполнения условий и требований по безопасности.

Все известные операции по извлечению ВВ из боеприпасов можно условно объединить в три группы.

1. Для удаления ВВ из боеприпасов, снаряженных тротилом и другими плавкими веществами на его основе, используют различные варианты контактного и неконтактного нагрева и плавления ВВ паром, расплавом парафина или тротила, горячей водой, индукционного способа нагревания корпуса боеприпаса и вымывание ВВ из корпуса боеприпаса струей воды высокого давления.

2. Крупногабаритные боеприпасы, снаряженные смесевыми плавкими ВВ, расснаряжаются различными способами вымывания высококипящими инертными жидкостями, а также струей воды высокого давления.

3. Боеприпасы, снаряженные неплавкими ВВ типов А-IX-1 (флегматизированный гексоген) и А-IX-2 (смесь флегматизированного гексогена с 20% алюминиевой пудры) прессованием в корпус, расснаряжаются различными способами механического разрушения разрывного заряда, в том числе струей воды высокого давления.

Не вызывает принципиальных сложностей извлечение ВВ (разрывного заряда) из корпуса боеприпаса, снаряженного раздельно-шашечным способом на закрепителе с относительно низкой температурой плавления. При нагревании корпусов таких боеприпасов закрепляющее разрывной заряд вещество плавится и компактированное ВВ легко извлекается.

Анализ подлежащих утилизации боеприпасов показывает, что они содержат около 70% тротила состава ТА (тротил-алюминий) и ТД (тротил-динитронафталин), 20% плавких смесей – тротил-гексоген или тротил-гексоген-алюминий, 7% неплавких ВВ типов А-IX-1 и А-IX-2, 3% прочих ВВ (жидких и пластичных ВВ, октогенсодержащих и др.).

Для утилизации боеприпасов тротилового снаряжения используют методы плавления ВВ при контактном и бесконтактном нагреваниях разрывного заряда.

9.2. Расснаряжение боеприпасов методом выплавки

Методы неконтактной выплавки. Технология и оборудование расснаряжения головных частей боеприпасов типа реактивных глубинных

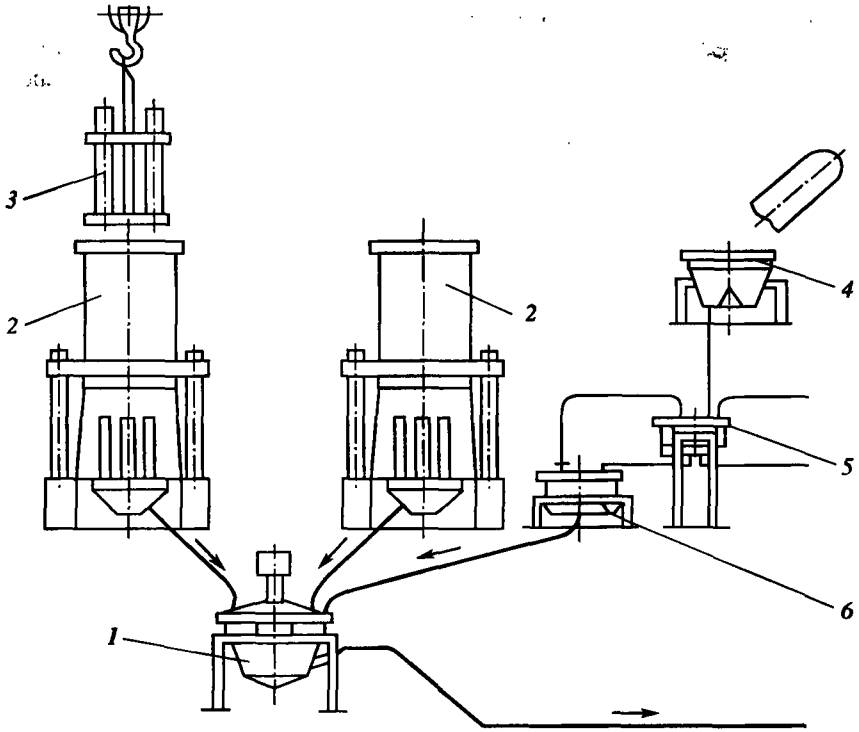


Рис. 9.1. Технологическая схема модуля выплавки

бомб (РГБ), снаряженных смесевыми взрывчатыми веществами (ТНТ, гексоген, Al) , основан на нагревании корпусов до температуры плавления ВВ и его истечении через горловину корпуса. Схема модуля выплавки ВВ представлена на рис. 9.1.

Подготовленные к выплавке ВВ изделия устанавливают в кассеты *3* по одному или группами, состоящими из нескольких штук. Кассеты с изделиями загружают в камеры установок выплавки *2*, куда подается пар, обогревающий внешнюю поверхность изделия и оплавники. При движении камеры выплавки вниз обеспечивают соприкосновение среза заряда с оплавником, обогреваемым паром. Затем включают вибраторы на камере выплавки и оплавниках. При этом происходит плавление ВВ, которое в виде расплава вытекает через кольцевой зазор между оплавником и очком корпуса изделия. Расплав направляется в сборник-разбавитель *1*. В сборнике-разбавителе извлеченный взрывчатый материал перемешивается с тротилом. Тротил предварительно плавится в плавителе *4*, накапливается в копильнике *5*, затем отмеренная в мернике *6* доза сливается в сборник-разбавитель, в котором про-

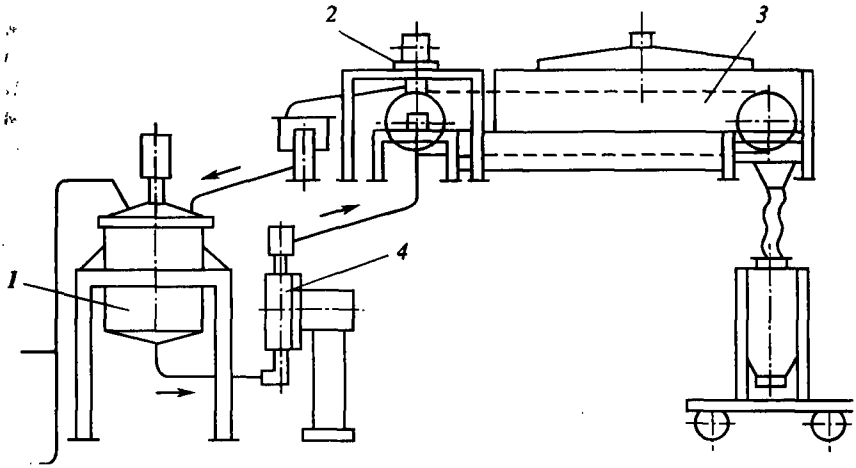


Рис. 9.2. Принципиальная схема установки гранулирования

исходит приготовление одной из специально разработанных рецептур промышленного ВВ.

Приготовленная в сборнике-разбавителе смесь сжатым воздухом передавливается в установку гранулирования.

Установка гранулирования (рис. 9.2) состоит из кондиционера *1*, диафрагменного насоса *4*, диспергатора *2*, ленточного кристаллизатора *3*.

Установка работает следующим образом. Из кондиционера термостатированная и дополнительно перемешанная смесь диафрагменным насосом подается в диспергатор. Здесь из расплава формируются капли, которые распределяются на охлаждаемую ленту кристаллизатора. При движении на ленте капли кристаллизуются, образуя гранулы полусферической формы. Затвердевшие гранулы собираются в накопительном бункере, из которого выгружаются в транспортную тару или расфасовываются в мешки.

Все технологические аппараты модуля выплавки и установки гранулирования связаны обогреваемыми трубопроводами. Контактирующие с взрывчатым материалом части оборудования и продуктопроводы выполнены из нержавеющей стали.

Техническая характеристика модуля выплавки

Производительность в смену, кг	900
Максимальные размеры обрабатываемых изделий, мм:	
диаметр	550
высота	720
Масса наполнителя одного изделия, кг	150
Количество одновременно обрабатываемых изделий, шт.	4–12

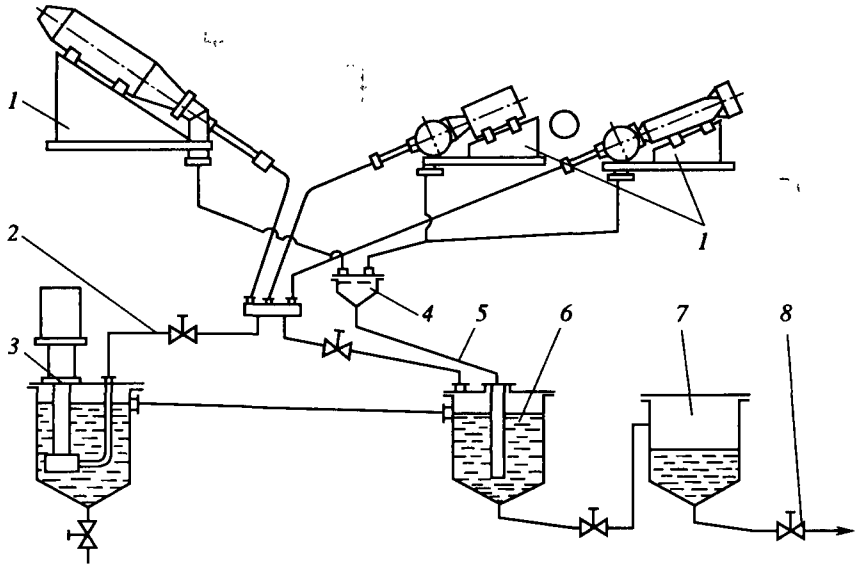


Рис. 9.3. Технологическая схема процесса вымывания ВВ расплавленным парафином

Управление работой установки осуществляется в местном или дистанционном автоматическом режиме с помощью электропневматической системы управления.

Метод струйной выплавки. Для утилизации крупногабаритных боеприпасов тротилового снаряжения используют метод вымывания ВВ расплавом парафина. Расплав парафина инертен по отношению ко всем типам ВВ в рабочем диапазоне температур, обладает большой теплоемкостью и низкой вязкостью (например, по сравнению с полиметилсилоксановыми жидкостями, расплавом тротила и др.); он взаимно нерастворим с тротилом, плотность расплава парафина почти в два раза ниже плотности расплава тротила. Парафин мало токсичен и взрывобезопасен; имеется сырьевая база для его производства.

Процесс выплавления ВВ проводится следующим образом (рис. 9.3). Подготовленное к расснаряжению изделие устанавливают на стапель *1* установки вымывания наклонно очком вниз и стыкуют через уплотнение с приемной воронкой. В очко изделия вводят форсунку, через которую в зарядную камеру подается расплав парафина из плавителя насосной станцией *3* по напорному трубопроводу *2*. Свободная поверхность заряда омывается струями расплава парафина; при этом внешний слой тротила расплавляется и уносится потоком расплавленного парафина. Смешанный расплав через фильтр *4* по сливному трубопроводу *5* поступает в аппарат-разделитель *6*, где сни-

жается турбулентность потока и происходит непрерывное гравитационное разделение расплавов парафина и тротила. Расплав парафина перетекает в насосную установку *3* и вновь нагнетается насосом в камору изделия на вымывание ВВ. Расплав тротила через гидравлический затвор, препятствующий проходу парафина, поступает в сборник тротила *7*, а затем через клапан *8* отправляется на кристаллизацию.

Извлеченный тротил перерабатывают в гранулы или чешуйки, разливают на плиты и после затвердевания и охлаждения разламывают на куски и измельчают. Полученный таким образом тротил используют для производства аммонитов.

Технологический процесс извлечения ВВ расплавом парафина является экологически чистым, так как используемые аппараты и коммуникации герметичны, выбросы паров вредных веществ в атмосферу исключены. В процессе вымывания парафином заряд ВВ полностью удаляется из корпуса изделия, дополнительная очистка корпуса перед разделкой в металлолом не требуется.

По рассмотренной технологии проведено расснаряжение авиационных бомб ФАБ-3000 (масса тротила 1400 кг), время вымывания ВВ составило 4 ч.

Техническая характеристика участка расснаряжения вымыванием расплавом парафина (разработка КНИИМ) [1]

Производительность по выплавляемому ВВ, кг/ч	350
Размеры расснаряжаемых изделий, мм:	
диаметр	273–1060
длина	1060–3320
Теплоноситель для вымывания	Парафин
Расход сжатого воздуха, $м^3/ч$	40
Расход пара на обогрев (при $T = 110 \div 120$ °С), кг/ч.	80

В КНИИМ проводятся работы по извлечению этим методом зарядов из гексогенсодержащих ВВ и утилизации извлеченных продуктов.

9.3. Расснаряжение боеприпасов методом гидравлического вымывания

Вымывание ВВ струей воды высокого давления позволяет извлекать как плавкие, так и неплавкие композиции разрывных зарядов при расснаряжении боеприпасов, имеющих сложную внутреннюю конструкцию.

Так, для извлечения гексогенсодержащих и других штатных ВВ из корпусов артиллерийских боеприпасов среднего калибра

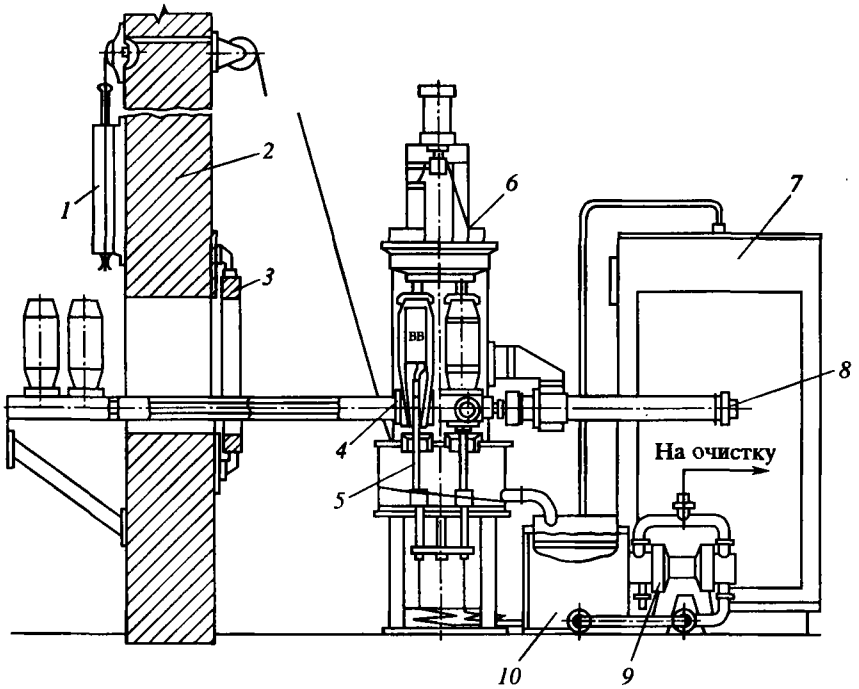


Рис. 9.4. Модуль вымывания кабинный

(100–152 мм), подлежащих утилизации, применяют установки модульного типа для вымывания ВВ струей высокого давления, обеспечивающие безопасность и экологическую чистоту технологического процесса. Каждая установка работает совместно с блоком очистки технологической воды.

Модуль вымывания кабинный (рис. 9.4) размещен в железобетонной кабине *2* с защитным шиберным устройством *3* специализированных снаряжательных заводов; при наличии аналогичных кабин модуль может применяться на базах и арсеналах хранения боеприпасов.

Модуль вымывания содержит П-образную раму *6* с закрепленным на ней вверху механизмом вращения снарядов. В центре П-образной рамы установлена пара направляющих с тележкой *4*, а внизу смонтирована емкость с двумя сопловыми головками *5*. Сопловые головки закреплены на штангах, которые связаны гибким трубопроводом с гидростанцией *7* и могут перемещаться в вертикальном направлении от пневматического привода *8*.

Подача корпусов в кабину осуществляется тележкой *4*, установленной на четырех катках и оснащенной приводом от телескопического пневмоцилиндра. Модуль имеет табло *1*, предназначенное для наблю-

дения за процессом вымывания (за передвижением сопел), которое установлено на внешней стенке кабины.

Управление работой модуля осуществляется с дистанционного пульта пневматической системы управления.

Вода под давлением порядка 250 МПа по гибкому трубопроводу поступает в сопловые головки *5* и через форсунки воздействуют на срез разрывного заряда, вымывая ВВ.

В нижней части модуля установлен сборник водной суспензии ВВ, представляющий собой емкость *10* с разделительными сетками под различные фракции продукта. Сборник связан трубопроводом с пневмонасосом *9*, который предназначен для перекачки суспензии «вода – ВВ» в блок очистки воды.

Техническая характеристика модуля вымывания кабинного (разработка КНИИМ)

Производительность по продукту, кг/ч	60–80
Скорость подачи сопловых головок, мм/с	2–5
Частота вращения изделия, мин$^{-1}$	50–90
Установленная мощность электрооборудования, кВт	32,5
Габаритные размеры (без гидростанции), мм:	
длина	3420
высота	1500
ширина	2400

Модуль вымывания магазинный применяется в обвалованных зданиях мастерских снаряжательных заводов и поэтому предусматривает повышенную загрузку по ВВ.

Модуль включает магазинное устройство, представляющее собой вертикально замкнутый цепной конвейер шагового перемещения. Конвейер оснащен трубчатыми горизонтально расположенными ложементами под изделия и приводом от пневмоцилиндра. На верхней ветви транспортера смонтирована головка вымывания, содержащая шпиндельную бабку с приводом, механизм подачи сопловой головки, который связан гибким трубопроводом с гидростанцией высокого давления.

Под выходными патрубками узла вымывания установлен сборник, представляющий собой емкость с разделительными сетками под различные фракции продукта. Сборник связан трубопроводом с пневмонасосом, который предназначен для перекачки суспензии типа «вода– ВВ» в блок очистки воды.

Магазинное устройство загружается снаряженными изделиями (верхняя и нижняя ветки). Дистанционно включается автоматический режим работы, и производится вымывание взрывчатого материала сразу из двух изделий. После окончания вымывания конвейер делает

ход на два шага вперед, и взрывчатый материал вымывается из следующих двух изделий. Процесс повторяется до вымывания всех изделий, находящихся на транспортере магазинного устройства.

Техническая характеристика модуля вымывания магазинного (разработка КНИИМ)

Производительность по продукту, кг/ч	70–90
Скорость подачи сопловых головок, мм/с	2–5
Частота вращения изделия, $мин^{-1}$	50–90
Количество изделий в магазине, шт.	34
Давление воды, МПа	250
Установленная мощность электрооборудования, кВт	32,5
Габаритные размеры (без гидростанции), мм:	
длина	3170
высота	1920
ширина	1450

Модуль вымывания кассетный по своим габаритам лучше всего подходит для использования на базах и в арсеналах хранения боеприпасов.

Модуль содержит основание, представляющее собой сварную конструкцию, на которой установлена головка вымывания. С противоположной стороны от головки вымывания смонтированы блок вращения и его привод. В центре основания модуля в направляющих швеллерах перемещается тележка, на которой на конических штырях расположена двухрядная кассета с 12 ложементами под изделия. В основании кассеты имеются четыре опорные поверхности с фиксирующими отверстиями. На основании модуля также смонтирован привод шагового перемещения тележки.

Под входным лотком головки вымывания установлен сборник, представляющий собой емкость с разделительными сетками на различные фракции продукта. Сборник связан трубопроводом с пневмонасосом перекачки суспензии типа «вода–ВВ» в блок очистки воды. Модуль монтируется вместе с гидравлической установкой высокого давления.

Кассета загружается снаряженными изделиями (верхний и нижний ряды), устанавливается на тележку и перемещается на позицию вымывания. Дистанционно включается автоматический режим работы. Срабатывают пневмоцилиндры перемещения головки вымывания, которые зажимают два изделия между упорными чашками блока вращения и головкой вымывания. Включаются привод вращения изделий и гидростанция высокого давления. Вода под давлением порядка 250 МПа поступает в сопловые головки. Включается гидроцилиндр

перемещения сопловых головок, и производится вымывание ВВ из изделия. После окончания вымывания двух изделий отключаются насос гидростации, привод вращения изделий и изделия освобождаются от зажимов. Включается привод шагового перемещения тележки, и кассета перемещается на один шаг. Затем технологический цикл повторяется.

Суспензия типа «вода–ВВ» по лотку из горловины узла вымывания поступает на разделительные сетки сборника. Здесь крупная фракция ВВ отделяется, а остальная часть воды с ВВ перекачивается насосом в блок очистки воды.

Процесс повторяется до завершения вымывания всех изделий, находящихся на кассете. В этот момент на дистанционном пульте управления высвечивается сигнал об окончании всего технологического цикла процесса вымывания ВВ из изделий.

Техническая характеристика модуля вымываниыя кассетного (разработка КНИИМ)

Производительность по продукту, кг/ч	50–70
Скорость подачи сопловых головок, мм/с	2–5
Частота вращения изделия, $мин^{-1}$	20–150
Установленная мошность электрооборудования, кВт	32,5
Давление воды, МПа	250
Габаритные размеры (без гидростанции и контейнера), мм:	
длина	3420
высота	1500
ширина	2400

Методы разделки боеприпасов и вымывания ВВ водной струей высокого давления используют и за рубежом. Так, фирмой "Alba Industries" (ФРГ) разработана система извлечения ВВ из боеприпасов высоконапорной струей воды (рис. 9.5). Система включает девять основных узлов, в том числе блок вымывания ВВ из корпуса боеприпаса *1*, насос *9* для подачи смеси вымываемого ВВ с водой, сепаратор *8* для разделения шлама из ВВ и воды, насос *7* для подачи оборотной воды, фильтр *6* для тонкой очистки оборотной воды, теплообменник *5* для отвода тепла, выделяющегося при работе насоса высокого давления, ресивер *4* для оборотной воды, промежуточный (буферный) насос *3*, насос *2* высокого давления.

Вода, используемая для вымывания, подается по оборотной схеме. От ресивера *4* промежуточный (буферный) насос *3* подает воду к насосу *2* высокого давления, который подает воду под максимальным давлением 50 МПа к блоку вымывания *1*; при этом расход воды ограничен 150 л/мин. Образующиеся при вымывании суспензии ВВ и вода

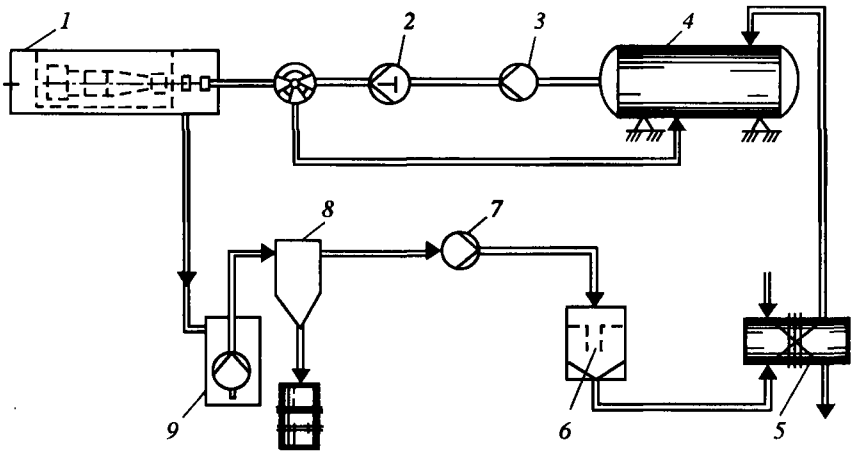


Рис. 9.5. Схема системы извлечения ВВ из боеприпасов высоконапорной струей воды

подаются насосом *9* в сепаратор *8*, где происходит их разделение. Осветленная вода поступает через насос *7*, фильтр *6* и теплообменник *5* обратно в ресивер *4*.

9.4. Расснаряжение боеприпасов гидровымыванием с гидрорезкой корпусов [1, 2]

Отечественные разработки. Метод расснаряжения боеприпасов вскрытием корпуса и последующего извлечения ВВ с помощью струи воды высокого давления (гидрорезка в сочетании с гидровымыванием), разработанный КНИИМ [1], позволяет утилизировать боеприпасы различного назначения и обеспечивать экологическую чистоту разработанных на его основе технологических процессов.

Расснаряжению этим методом подлежат боеприпасы с корпусами из алюминиевых сплавов, снаряженные составами типа ТГА, доступ к заряду которых ограничен конструктивными особенностями, например, наличием боевых зарядных отделений (БЗО) торпед.

Участок утилизации боеприпасов методом гидровымывания в сочетании с гидрорезкой корпусов (рис. 9.6) включает универсальную установку размывания *2* в комплекте с насосными установками для гидрорезки корпусов *1* и гидровымывания *10*, а также замкнутую систему очистки технологической воды *12*. Кроме того, участок снабжен комплексной системой дистанционного управления технологическим процессом по заданным программам.

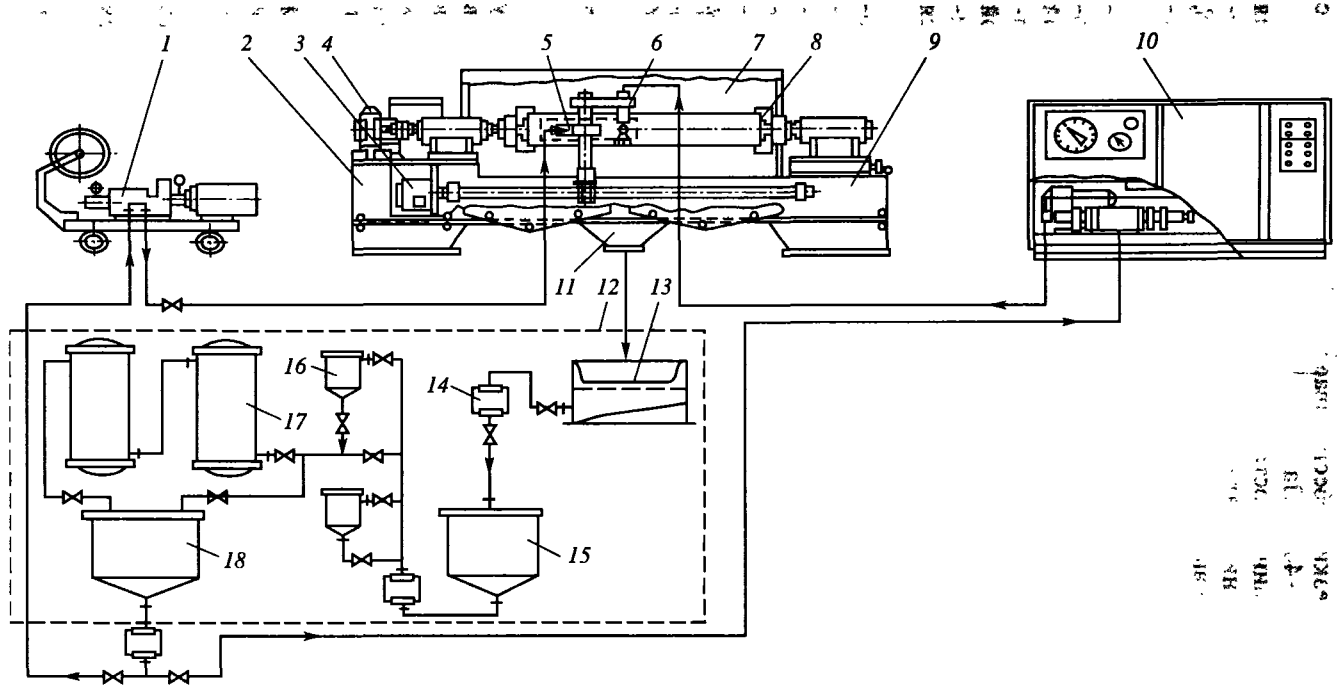


Рис. 9.6. Технологическая схема утилизации боеприпаса методом гидровымывания в сочетании с гидрорезкой корпусов

Установка гидрорезки *1* обеспечивает расход воды до 2,5 л/мин с рабочим давлением до 400 МПа.

Установка размывания *2* состоит из станции *9*, приводов вращения изделия *4* и перемещения штатива *3* с закрепленными на нем головками для гидрорезки *6* и вымывания *5*, устройства для зажима изделия *8*, защитного кожуха *7* и устройства для сбора водной суспензии взрывчатого вещества *11*.

Система очистки воды содержит емкость с фильтром *13*, где отделяется основная масса вымытого ВВ. После фильтра загрязненная вода пневматическим насосом *14* подается в емкость для отработанной воды *15*, в которой она собирается и охлаждается. Далее вода очищается на фильтрах тонкой очистки *16* и собирается в емкости для чистой воды *18*, откуда возвращается в технологический цикл. При необходимости и пред сбросом в канализацию вода дополнительно очищается от растворенных нитросоединений в адсорбционных колоннах *17*.

Технологический процесс извлечения ВВ осуществляется следующим образом. Боеприпасы завозятся в мастерскую, проходят подготовительные и контрольные операции, затем подают на установку размывания. Вскрытие корпуса и размывание ВВ осуществляются дистанционно. Вымытое ВВ, отделенное от воды на фильтре, периодически выгружается из него и передается на дальнейшую переработку. Корпуса после контроля направляются для разделки в металлолом. Экологическая чистота процесса обеспечивается системой очистки воды.

Зарубежные разработки. Общая технологическая схема системы для разрезания корпуса боеприпаса высоконапорной водяной струей с абразивным материалом фирмы "Alba Industries" показана на рис. 9.7.

Из ресивера *10* промежуточным насосом *11* воду подают к насосу высокого давления *12*. Затем под давлением 33 МПа она поступает в режущую головку *1*. Требуемое количество абразивного материала в высоконапорный водяной поток добавляется с помощью специальных устройств *2*. Высоконапорная абразивная струя воды после операции резки поступает в приемник, откуда насосом *3* подается на сито *4*. Здесь происходит отделение крупной фракции абразивного материала, которую направляют на повторное использование. Вода и тонкий абразив после сита подаются насосом *8* в сепаратор *5*, где осаждается тонкий абразив, не используемый в дальнейшем. Насос *6* подает осветленную воду через фильтр *7* и теплообменник *9* обратно в ресивер *10*.

Рассматриваемая система с абразивной водяной струей высокого давления может применяться для резки:

- артиллерийских снарядов, мин, бомб, боеголовок, заполненных различными ВВ;
- оболочек взрывателей, которые не могут быть разобраны;
- специфического вырезания взрывателей из мин или бомб;

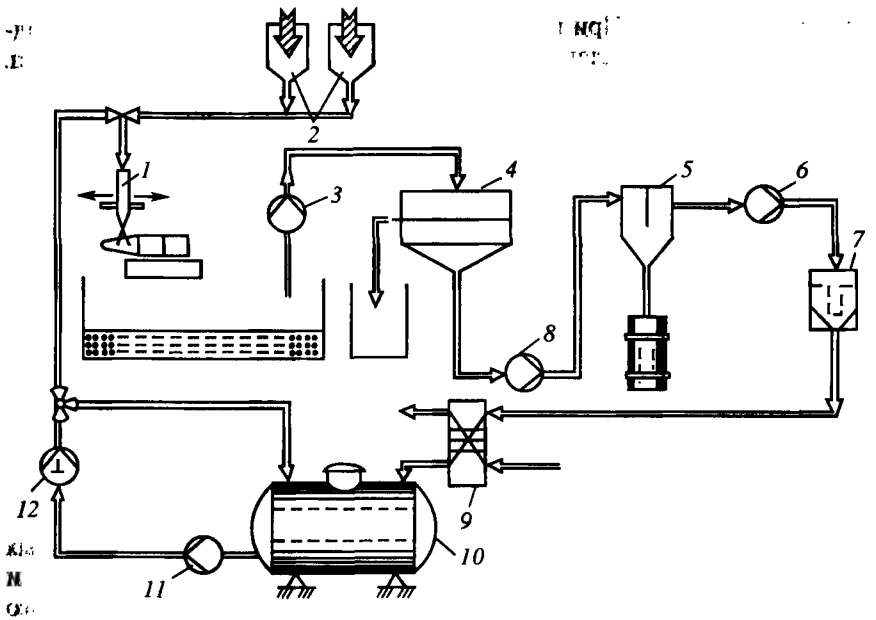


Рис. 9.7. Схема системы вымывания ВВ из боеприпаса высоконапорной абразивной водяной струей

- гильз взрывателей и пиротехнических композиций;
- ракетных двигателей и т. п.

Основные характеристики системы [1]

Максимальное давление воды, МПа	33
Температура в зоне реза, °С	менее 80
Максимальный расход воды, л/мин	70
Расход абразива, кг/мин	4–8
Удаление режущей насадки от насоса, м	500
Продолжительность разделения головных частей гильз калибра 155 мм, мин	2

Фирма "Tracor Hydronautics" (США) начала производство установок типа CAVIJET для удаления ВВ при расснаряжении 155-миллиметровых снарядов и мин с помощью кавитационной водяной струи высокого давления. Снаряд закрепляется во вращающемся патроне на наклонной станине. Струя воды под высоким давлением за 1,4 мин вымывает из снаряда все содержащиеся ВВ. Дальнейшая регенерация ВВ производится методом фильтрования с последующей сушкой и

гранулированием. При необходимости осуществляется обработка адсорбентами для удаления вредных примесей и инородных частиц. Сушка отфильтрованного ВВ обеспечивается в вакууме. Полученное чистое ВВ используется в военных и гражданских областях, а также для снаряжения учебных боеприпасов.

Проблемами расснаряжения и утилизации боеприпасов занимается также шведская фирма «Шведиш орднанс» [1].

Метод гидродинамического размыва используется при расснаряжении твердых ракетных двигателей с утилизацией измельченного продукта в виде добавок в промышленные ВВ [1, 2].

9.5. Промышленные взрывчатые вещества на основе взрывчатых веществ и порохов утилизируемых боеприпасов [1, 2]

Промышленные ВВ, изготовляемые из расснаряженных разрывных зарядов. Промышленные ВВ на основе извлекаемых из боеприпасов взрывчатых материалов (бризантных ВВ, порохов, твердых ракетных топлив) не должны уступать по эффективности, технологической и экологической безопасности промышленным ВВ традиционного штатного производства. Способы их переработки в изделия должны быть по возможности адаптированы к существующим основным процессам и аппаратам технологии производства штатных промышленных ВВ и осуществляться не только на специализированных заводах, но и непосредственно на базах (арсеналах) хранения боеприпасов.

Тротил и его смеси обладают следующими свойствами. Тротил-У – промышленное взрывчатое вещество, изготовляемое из тротила, извлеченного из боеприпасов при расснаряжении; выпускается двух марок – УД и УГ.

Тротил марки УД (дробленный) производится в виде кусков полидисперсного состава, предназначен для ручного заряжания скважин. Тротил марки УГ (гранулированный) производится в виде гранул размером 3–5 мм, предназначен для ручного и механизированного заряжания скважин.

Основные физико-механические и взрывные характеристики тротила-У

Температура затвердевания (плавления), °С, не менее	80
Массовая доля влаги и летучих веществ, %, не более	2
Массовая доля веществ, нерастворимых в органических растворителях (в том числе примеси), %, не более	1,5
Кислотность в пересчете на серную кислоту, %, не более	0,01
Насыпная плотность, кг/м^3:	
марки УД	750–800
» УГ	900–1000
Плотность кусков и гранул, кг/м^3, не более	1450

Теплота взрывного превращения, кДж/кг	3645–4064
Объем газов при взрыве тротила, л/кг:	
сухого	710
водонаполненного	895
Газовое загрязнение в пересчете на условную окись углерода, л/кг	345
Кислородный баланс, %	−74
Скорость детонации тротила, км/с:	
сухого	4,0–4,6
водонаполненного	5,0–5,5
Критический диаметр, мм:	
в стальной оболочке	10–15
в бумажной оболочке	60–80
Фугасность, $см^3$	285–295
Бризантность, мм, не менее	15
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	10^7–10^{10}
Чувствительность к удару:	
частость взрывов в приборе № 1, %	0–2
нижний предел, мм	500
Чувствительность к трению на приборе К-44-3, %, при усилии прижатия:	
686,5 МПа	4
1078,7 МПа	100

Тротил-У относится к взрывчатым веществам 1-го класса, используется для заряжания обводненных и сухих скважин при производстве взрывных работ на земной поверхности во всех климатических районах. Температурные пределы применения +50...−60 °С. Диаметр скважин не менее 150 мм с агрессивностью среды pH = 5 ÷ 8.

Из тротила-У методом прессования изготовляют промежуточные модульные детонаторы (типа ДПМ-250, ДПМ-350), шашки-детонаторы (Т-400Г), источники сейсмических волн (ИС-100).

Граммониты 30/70, 40/60 предназначены для производства взрывных работ на земной поверхности с заряжанием сухих и обводненных скважин. Изготавливаются из тротила-У или тротила любой марки в виде гранул полусферической формы размером до 8 мм; содержат в составе 30 или 40% аммиачной селитры.

Алюмотол предназначен для взрывных работ при заряжании на земной поверхности в забоях любой степени обводненности, в том числе в забоях с проточной водой. Изготавливается методом сухой грануляции из утилизированного состава ТА (тротил-алюминий). Выпускается в виде гранул сферической и полусферической формы размером до 8 мм.

Смеси ВВ, содержащие гексоген, имеют следующее предназначение. Сухие и влажные смеси (А-IX-1, А-IX-2, А-IX-20), литьевые смеси (МС, ТГ, ТГА-16, ТГАГ-15, ТГАФ-5М) используются при изготовлении *альгетолов* (альгетол-15, -25, -35), содержащих в своем составе со-

ответственно 15, 25 и 35% гексогена. Это наиболее мощные из существующих составов промышленных ВВ, обладающих практически неограниченной водостойкостью, изготавливаются методом сухой грануляции. Альгетолы предназначены для производства взрывных работ на земной поверхности с заряжанием сухих и обводненных скважин.

Из альгетолов изготавливают литьевые заряды для источников сейсмических волн (ИС-500ТГА, ИС-1000ТГА).

Изготовление промышленных ВВ из утилизируемых порохов и твердых ракетных топлив.

Промышленные ВВ на основе утилизируемых порохов предназначены для производства взрывных работ на открытых горных разработках скважин любой степени обводнения, в том числе скважин с проточной водой.

Промышленные ВВ из измельченных порохов и твердого ракетного топлива используются для получения следующих материалов. На основании утилизируемых пироксилиновых и баллиститных порохов разработаны и допущены к промышленному использованию различные рецептуры промышленных ВВ, основные из них [1, 2]: поротол, гранипоры марок БП-1 и БП-3 (разработчик ФЦДТ «Союз»); диабазиты (разработчик НИИПМ).

Поротол представляет собой композицию из зерен утилизируемого пироксилинового пороха и тротила. Он водостоек и предназначен для снаряжения сейсмических зарядов, дробящих плоских комбинированных зарядов (типа ЗДПК) и других изделий для специальных взрывных работ.

Гранипоры представляют собой смесь измельченных пироксилиновых и баллиститных порохов в соотношении 1:1 с добавлением индустриального масла в количестве 1,5%. Рецептуры гранипоров приведены в табл. 9.1.

В составе диабазита содержится измельченный баллиститный порох или пироксилиновый порох (95–98%), окись цинка или цинкового белила (2–5%), а также индустриальное масло до 2%.

Таблица 9.1

Состав гранипоров

Компоненты	Содержание компонента, %, в гранипоре марки			
	Б1	Б2	Б3	ВС
Нитроцеллюлоза	55–60	55–63	57–60	28–45
Пластификаторы	30–40	30–40	39–41	13–30
NH_4NO_3	–	–	–	20–50
Добавки	2–6	3–5	1,3	1,5–2,5
Влага (не более)	3	3	2	4

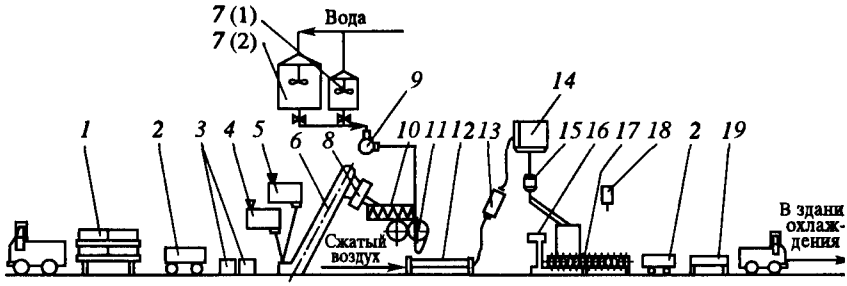


Рис. 9.8. Технологическая схема изготовления промышленного ВВ «Диабазит»:

1 – исходный продукт; *2* – тележка; *3* – баки для разогрева исходного продукта; *4* – дозатор; *5* – дозатор окиси цинка; *6* – элеватор; *7(1)*, *7(2)* – суспензаторы объемами соответственно 40 и 65 л; *8* – пламегидрозатвор; *9* – перистальтический насос; *10* – винтовой конвейер; *11* – вальцы; *12* – зашивочная установка; *13* – пламегаситель-гидрозатвор; *14* – разгрузитель; *15* – пламеотсекатель; *16* – напольные весы; *17* – рольганг; *18* – зашивочная установка; *19* – стеллаж

Промышленные ВВ на основе утилизируемых порохов по степени обращения и условиям применения относятся к классу 1.

Технологический процесс изготовления промышленных ВВ на основе порохов предусматривает максимальное использование существующих производственных площадей, оборудования и инфраструктуры предприятий специальной химии.

Технологический процесс включает следующие основные операции:

термостатирование пороховых трубок, шашек зарядов при температуре 40...60 °С;

измельчение трубок из пироксилиновых и баллиститных порохов, шашек зарядов твердого ракетного топлива (ТРТ) на фрагменты с размерами не более 20 мм;

дозирование и смешивание измельченных порохов с добавками (индустриальным маслом, окисью цинка и др.);

расфасовка и упаковка готового промышленного ВВ.

Технологическая схема производства гранулированного или таблетированного промышленного ВВ типа дибазит на основе утилизируемых порохов показана на рис. 9.8.

Составы на основе гелеобразных и эмульсионных ВВ обладают следующими свойствами. Одним из направлений использования измельченных пироксилиновых (ПП) и баллиститных (БП) порохов, а также твердых ракетных топлив (ТРТ) и смесевых ракетных твердых топлив (СРТТ) является их ввод в состав водосодержащих ПВВ.

Композиции гелеобразных ВВ, сенсибилизированные крошкой БП или ТРТ, получили название гельпоры (Гельпор-1, -2, -3); они со-

Таблица 9.2

Техническая характеристика промышленных ВВ, содержащих утилизируемые взрывчатые материалы [1]

Взрывчатое вещество	Теплота взрыва, кДж/кг	Температура вспышки, °С	Плотность, кг/м^3	Скорость детонации, км/с	Кислородный баланс, %
Тротил-У	3900	295–305	750–800	5,0–5,5	–74,0
Граммонит 30/70	3768	315–320	800–900	3,8–4,5	–45,9
Граммонит 40/60	3747	320–325	800–900	3,7–4,4	–36,5
Альгетол-15	4735	210	900–1000	4,6	–80,8
Альгетол-25	4860	210	900–1000	4,8	–78,8
Альгетол-35	4986	210	900–1000	5,0	–75,9
Эмульсен-П	3200	190	1500	5,2–5,5	–15,6
Гельпор-1	3771	170–185	1300–1400	5,0–5,2	–(0,8–14)
Гельпор-2	4190	175–185	1300–1400	4,5–5,3	+(3–8)
Гельпор-3	3561	170–190	1300–1400	5,1–5,3	+(1,9–6,7)
Поротол	3875	170–180	1500	6,5	–59,4
Гранипор ППФ	3436	180–190	800–900	5,5–6,3	–(42–45)

стоят из матрицы и измельченного пороха. Матрица, как известно, включает водный раствор аммиачной селитры, загущенный гелеобразователем, технологические и структурирующие добавки.

В рецептуру одной из композиций (Гельпор-2) входят следующие компоненты, %:

Аммиачная селитра 50,5
Крошка БП (размер до 3 мм) 35,0
Вода 13,0
Загуститель 1,5
Структурирующая добавка (сверх 100%) 0,01–0,1

Технические характеристики промышленных ВВ типа гельпоров приведены в табл. 9.2.

При утилизации СРТТ в качестве ПВВ возникают экологические проблемы, связанные с наличием в их составах хлоросодержащих компонентов. В продуктах горения и взрыва таких композиций содержатся вредные вещества: хлор, хлористый водород и др. Нейтрализация хлора возможна за счет связывания его щелочными металлами (например, K, Na, Ca) с образованием солей, безвредных для окружающей среды (KCl, NaCl, $CaCl_2$).

В настоящее время созданы композиции водногелевых и эмульсионных ПВВ, содержащие 20–25% измельченной крошки утилизируемых СРТТ (разработчики ФЦДТ «Союз», НИИПМ и др.). Для исклю-

чения хлористого водорода в продуктах взрыва в состав водно-гелевых и эмульсионных ВВ вводят такие компоненты, как $NaNO_3$, KNO_3, $Ca(NO_3)_2$.

Водосодержащие гелеобразные и эмульсионные ВВ, состоящие из матрицы (75–80%) и измельченного СРТТ (20–25%) получили название соответственно аквапаны и эмульпаны. Матрица одной из рецептур («Эмульпан») содержит следующие компоненты, %:

Нитрат аммония	64,3
Нитрат натрия	13,2
Вода	16,4
Трансформаторное масло	4,9
Эмульгатор	1,2
Сенсибилизатор (сверх 100%)	2,0

Добавление 25% крошки СРТТ в эмульсионное ВВ позволяет увеличить его плотность от 1250 до 1300 кг/м^3, а теплоту и силу взрыва в 1,4 раза. По характеристикам безопасности эти ВВ могут быть отнесены к 1 классу. Такие ВВ предназначены для открытых работ в сухих и обезвоженных скважинах.

Технические характеристики водосодержащих ВВ с СРТТ [2]

	«Аквапан»	«Эмульпан»
Теплота взрыва, кДж/кг	3687	3855
Тротиловый эквивалент	0,72	0,72–0,75
Критический диаметр детонации, мм	65	45
Скорость детонации, км/с	3,8–4,2	4,2–5,2
Температура разложения, °С	>190	>200
Объем продуктов взрыва, л/кг	–	890
Плотность, кг/м^3	–	1290–1320
Кислородный баланс, %	–2,8	–12,6

Производство эмульсионных ВВ с добавлением измельченных фрагментов СРТТ осуществляется и за рубежом.

Технологическая схема измельчения вымытых из двигателя фрагментов твердого ракетного топлива в среде десенсибилизирующей (ослабляющей чувствительность) жидкости (рис. 9.9) имеет следующие особенности. Куски топлива подвергаются измельчению сначала на дробилке, затем на мельнице. Измельчение топлива происходит в среде десенсибилизирующей жидкости, которая готовится в емкости путем растворения в воде гуаровой смолы, нитратов аммония и кальция. Эти компоненты входят в рецептуру промышленных ВВ, изготавливаемых с добавлением измельченного смесевого твердого топлива.

На рис. 9.10 приведена принципиальная схема производства подобных ВВ промышленного применения, предложенная фирмами США «Тиокол» совместно с «Дайна-Нобель».

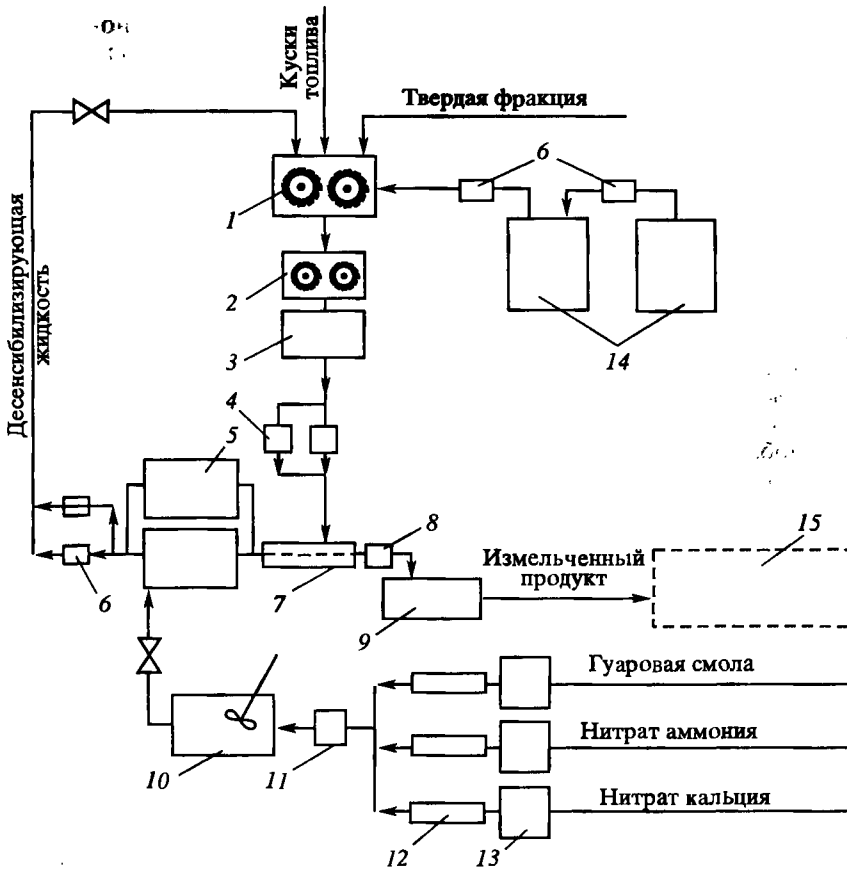


Рис. 9.9. Технологическая схема измельчения СРТТ в среде десенсибилизирующей жидкости для использования в качестве добавки в эмульсионное промышленное ВВ:

1 – дробилка; *2* – мельница; *3* – резервуар измельченного продукта; *4* – насосы для суспензии; *5* – баки десенсибилизирующей жидкости; *6* – насосы; *7* – вибросито; *8* – детектор металла; *9* – конвейер затаривания измельченного топлива в емкость; *10* – бак смешивания десенсибилизирующей жидкости; *11* – ковшевой подъемник; *12* – шнеки; *13* – емкости для добавок; *14* – отстойники; *15* – склад

Эмульсионное ВВ изготовляют путем смешивания водного раствора окислителей (смесь нитратов аммония, натрия и кальция) с другими добавками. Полученную композицию смешивают со смесью жидких компонентов, которая состоит из мазута, минерального масла и эмульгатора. Приготовленная эмульсия насосом перекачивается в другой смеситель, где в эмульсию добавляется измельченное десенси-

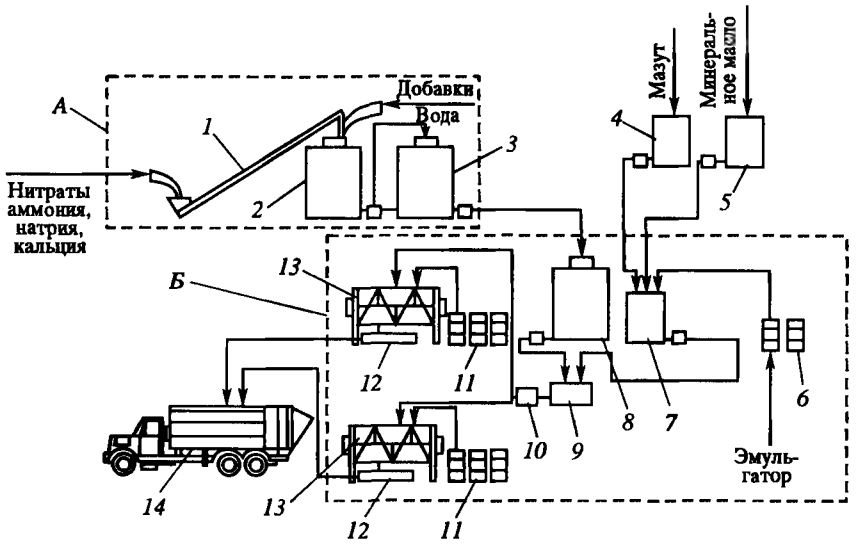


Рис. 9.10. Принципиальная схема производства эмульсионного ВВ с добавлением измельченного СРТТ, предложенная фирмами «Тиокол» и «Дайна Нобель»:

А – здание подготовки нитратов аммония, натрия, кальция; *Б* – здание приготовления эмульсий; *1* – шнек; *2* – резервуар смешивания окислителей с добавками; *3*, *8* – соответственно сборный и накопительный резервуары окислителя; *4*, *5* – расходные емкости соответственно мазута и минерального масла; *6*, *7* – емкости соответственно эмульгатора и жидких горючих компонентов; *9* – блок смешивания эмульсии; *10* – перекачивающий насос эмульсии; *11* – емкость для измененного десенсибилизированного топлива; *12* – перекачивающий насос эмульсионного ВВ; *13* – смеситель; *14* – специализированная машина для доставки эмульсионного ВВ

билизированное топливо. После перемешивания компонентов готовое ПВВ насосом подается в специализированную СЗМ для транспортирования на место потребления.

В заключение необходимо отметить, что для утилизации боеприпасов, которые по техническому состоянию непригодны к транспортировке, создаются передвижные модульные установки непосредственно в местах хранения таких боеприпасов. В передвижных установках используются такие же технологии извлечения взрывчатого материала из боеприпаса, как и на стационарных участках: выплавка тротилосодержащих ВВ; вымывание взрывчатых материалов струями высокого давления; различные методы механического разрушения разрывных и твердотопливных ракетных зарядов.

Важное значение при решении проблемы утилизации боеприпасов имеет поиск безопасного использовния извлеченных из боеприпасов

взрывчатых материалов (ВВ и порохов), поскольку наибольший экологический вред природе наносит их уничтожение подрывом или сжиганием.

Использование в ПВВ извлеченных из боеприпасов взрывчатых материалов не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на общий объем производства. В 1992 г. в России было произведено около 1,3 млн т ПВВ. В этом объеме доля взрывчатых материалов, извлеченных из боеприпасов, составила только несколько процентов. Однако их абсолютное количество представляет большую материальную ценность и не должно уничтожаться подрывом или сжиганием также и по экологическим соображениям.

Возможны и перспективные пути применения утилизируемых взрывчатых материалов – это получение путем взрыва ультрадисперсных технических алмазов, тугоплавких материалов, красок, получение из тротила триаминотолуола как сырья для химической промышленности, окислов азота, азотной кислоты, аммиачной селитры и др.

Литература

1. Промышленные взрывчатые вещества на основе утилизированных боеприпасов: Учеб. пособие для вузов/Под общ. ред. Ю.Г. Щукина. – М.: Недра, 1998. – 319 с.

2. *Забелин Л.В., Гафиятуллин Р.В., Кузьмицкий Г.Э.* Защита окружающей среды в производстве порохов и твердых ракетных топлив. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 174 с.

ГЛАВА 10

ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

10.1. Общие положения [1–7]

Требования надежности. Производство промышленных ВВ является крайне взрыво- и пожароопасным и требует особых условий обеспечения безопасности персонала, сохранности оборудования и зданий.

До недавнего времени активная борьба с взрывами в производствах взрывчатых материалов считалась практически невозможной, что объяснялось чрезвычайно высокой скоростью развития процесса распространения горения и взрыва. Однако благодаря успехам, достигнутым в области физики взрыва, процессов и аппаратов специальной химии, были разработаны эффективные методы защиты и быстродействующие системы, с помощью которых обеспечивалось своевременное подавление взрыва в начальной стадии его развития.

В результате были выработаны принципиально новые подходы к методам расчета и требованиям параметрической надежности технологического оборудования для взрывоопасных производств.

Первое и главное требование: оборудование должно быть либо снабжено автоматическими средствами взрыво- и пожарозащиты, которые органично вписываются в конструкцию аппарата без значительного усложнения ее, либо сконструировано так, что в нем были бы исключены (или сведены до минимума) все случаи возникновения загорания и взрыва. Второе: следует попытаться выбрать максимально безопасный технологический процесс, в котором перерабатываемые материалы как можно реже находятся во взрывоопасном состоянии. Тогда и оборудование можно создать менее сложным.

Современный технологический комплекс производства специальной химии (в том числе и производство промышленных ВВ) состоит из двух частей: аппаратов и систем управления. Поэтому вопрос безопасности надо рассматривать комплексно в двух аспектах – это повышение безопасности за счет совершенствования конструкции технологического объекта (аппарата) и технических параметров его работы, а также совершенствование системы контроля и управления.

Пожаро- и взрывобезопасность производства обеспечиваются следующими общими техническими мероприятиями:

- выбор такого технологического процесса, в котором исключалось бы возникновение режимов, приводящих к загоранию или взрыву материалов, и по возможности автоматическое регулирование основных технологических параметров;
- разработка такого оборудования и отдельных его узлов, в которых исключалось бы загорание или взрыв в них материалов;
- обеспечение локализации или подавления очага возникшего пожара или взрыва с помощью быстродействующих автоматических средств;
- применение новых конструкционных материалов, обеспечивающих пожаро- и взрывозащиту технологического оборудования.

Кроме того, защита обслуживающего персонала обеспечивается дистанционностью проведения опасных технологических операций, созданием специальных защитных устройств (железобетонные кабины, обваловка производственных зданий) и расположением их на безопасном расстоянии.

Категорийность фаз производства. Все требования к существующему оборудованию для производств специальной химии, правила его размещения, эксплуатации и ремонта, конструкции зданий и мероприятий по пожаро- и взрывозащите строго регламентируются двумя документами [1, 2], содержащими правила устройства и эксплуатации (далее Правила) предприятий спецхимии. Знание этих документов и обеспечение изложенных в них требований обязательно для каждого специалиста при разработке и эксплуатации оборудования для этих производств. Один из основных вопросов, с которых начинается проектирование оборудования, установление его категорийности, которая определяется взрывчатыми свойствами перерабатываемых материалов, объемом загрузки оборудования ВВ и взрывоопасностью всего технологического процесса.

Распределение производств и оборудования на стадии проектирования по категориям опасности имеет большое значение для создания безопасных условий труда. В зависимости от категорийности формулируются требования не только к конструкциям зданий, противопожарным разрывам, но и к конструкциям технологического оборудования. В зависимости от категорийности по фазам производства, которая зависит от вида прогнозируемого взрывного процесса при аварийной ситуации, все производственные здания в соответствии с Правилами [1] делятся на четыре категории по степени пожароопасности: А, Б, В, Г.

Помещения категории А и Б являются взрывоопасными, т. е. при возникновении аварийной ситуации не исключается возникновение взрывного процесса во взрывчатых материалах, находящихся в этих помещениях.

К помещениям категории А относятся такие производственные сооружения, возможный взрыв в которых сопровождается не только разрушением данного здания, но и способен вызвать серьезные повреждения соседних зданий. Здания категории А выполняются облегченными (железобетонные колонны, с тонкими стенками из кирпича или других подобных материалов, с легкой кровлей). Здания категории А обычно обваловываются до высоты вертикального среза строения. Обваловка в значительной степени препятствует разлету осколков и элементов конструкции при взрыве.

К категории Б относят здания, возможный взрыв в которых локализуется, т. е. действие взрыва не распространяется на соседние здания и помещения. Современные помещения категории Б представляют собой железобетонные кабины без обваловки; три стены кабины, отделяющие ее от остальной части здания и других кабин, выполняются с таким расчетом, чтобы они не разрушались при взрыве. Наружная (вышибная) стена представляет собой застекленный оконный проем. Перед вышибной стеной на некотором расстоянии устанавливается бетонная или каркасно-засыпная стена, препятствующая при взрыве распространению ударной волны и разлету осколков.

Помещения категории В и Г являются огнеопасными, т. е. в них находятся взрывчатые материалы, способные гореть без доступа воздуха, но не способные к взрыванию. При возникновении аварийной ситуации в них возможно только горение.

К помещениям категории В относятся такие производственные сооружения, возможный пожар в которых воздействует на соседние здания и способен вызвать существенные повреждения (загорание ВВ, конструкций и т. п.). Здания категории В представляют собой обычные строительные конструкции облегченного типа.

К помещениям категории Г относятся помещения, возможный пожар в которых локализуется внутри них. Локализация может достигаться различными способами, в том числе и с помощью системы автоматической пожарной защиты.

Прогнозирование вида взрывного процесса и масштабов его внешнего воздействия, что является определяющим фактором при выборе категории здания, производится на основе изучения комплекса взрывчатых свойств находящихся в нем врывчатых материалов применительно к конкретным условиям и оценки действия возможного взрыва по так называемому «тротиловому эквиваленту взрыва».

С целью обеспечения безопасности обслуживающего персонала отраслевые Правила [1] предусматривают регламентирование расстояний между производственными зданиями в зависимости от их категорийности и массы находящихся в них ВВ, пересчитанных по установленным нормам на «тротиловый эквивалент взрыва» [1, 5, 6].

Особенности разработки взрывобезопасных технологических процессов и аппаратов. При разработке взрывобезопасного технологического

процесса необходимо учитывать характер изменения *взрывчатых свойств перерабатываемого материала* на всех фазах процесса, не допуская возникновения критических режимов. С другой стороны, необходимо надежно поддерживать интенсивность воздействия рабочих органов аппаратов на взрывчатое вещество на достаточно низком уровне. Это обеспечивается *надежной работой технологических аппаратов и контрольно-измерительной системы.*

При выборе взрывобезопасного технологического процесса производства промышленных ВВ необходимо знание взрывчатых свойств не только композиций рецептурно-регламентированного состава, но также и промежуточных композиций со всеми возможно регламентированными отклонениями от нормы. Рассмотрим перечень основных показателей взрыво- и пожароопасности.

Показатели чувствительности к тепловым воздействиям – температуры вспышки, воспламенения и самовоспламенения; чувствительность к искровому разряду; стойкость (химическая стойкость и физическая стабильность).

Показатели чувствительности к механическим воздействиям – чувствительность к удару, ударному сдвигу и трению.

Показатели восприимчивости к детонации – минимальный инициирующий импульс, критический диаметр детонации; расстояние передачи детонации; критическое давление возбуждения детонации.

Показатели взрывоопасности: – бризантность и фугасность, склонность к переходу горения в детонацию (ПГД); концентрационные пределы взрываемости горючих паров, газов и пылей в смеси с воздухом.

Анализ зарубежных информационных источников показывает, что за рубежом нет принципиально новых или ранее неизвестных методов определения взрывчатых характеристик. Основной особенностью современных работ по оценке взрывоопасности ВВ, осуществляемых, например, в США и Японии, является то, что их стали проводить с учетом результатов испытаний не по отдельным показателям, а по всему комплексу проб и характеристик, а также в соответствии с рекомендациями ООН [1,6, 7].

В сборнике «Стандарты США» указаны следующие показатели для оценки взрывчатых характеристик:

- чувствительность к удару;
- чувствительность к трению;
- возможность прострела винтовочной пулей;
- чувствительность к нагреву (определение температуры);
- чувствительность к электрической и тепловой искре;
- чувствительность к детонационному импульсу;
- бризантность;
- передача детонации на расстояние;

- скорость детонации в стальной трубе;
- тротиловый эквивалент;
- эффект воздушной ударной волны (УД).

В последнее время в США отмечена тенденция создания математических моделей с различными предположениями как относительно физических механизмов образования тепла (ударное инициирование ВВ), так и относительно того, какие поверхности (ВВ – металл, ВВ – абразив и т. п.) при инициировании трением являются критическими.

Подробные сведения о стандартных или регламентированных отечественных методах определения указанных показателей взрыво- и пожароопасности взрывчатых материалов и их количественные значения можно найти в работах [3–6]; они составляют предмет дисциплины «Теория взрывчатых веществ и порохов» и в данной книге специально не рассматриваются.

Зная взрывчатые свойства промежуточных и конечных взрывчатых композиций и исходных взрывчатых компонентов, можно выбрать оптимальные по безопасности технологические режимы (параметры) работы используемых процессов и аппаратов. Это касается режимов загрузки компонентов в аппараты, при которых снизится не только вероятность загорания, но и внешний взрывной эффект при аврийной ситуации. Это обеспечивает создание безопасных и производительных фаз производства. Например, нитрат аммония (аммиачная селитра) в чистом виде является достаточно безопасным взрывчатым материалом; организация ее переработки в процессах измельчения, классификации, сушки не требует применения особых мер по обеспечению взрывобезопасности. Более того, для ее подрыва требуется мощный инициирующий импульс от взрыва другого ВВ. Смеси же аммиачной селитры с горючими веществами органического и неорганического происхождения обладают повышенными взрывчатыми свойствами, обусловленными определенным содержанием горючих добавок. Для безопасной переработки таких смесей необходимы специальная взрывозащищенная аппаратура и организация специальной фазы производства. Изменение порядка ввода исходных компонентов – введение горючих добавок (например, порошка алюминия) не в массив аммиачной селитры, а в нефтепродукт, позволило обойтись без этих мероприятий и упростить технологию производства промышленного ВВ типа гранулитов.

Все технологические параметры (например, температура, давление и др.) процессов производства ПВВ должны соответствовать нормам взрывобезопасности. При этом к оборудованию предъявляются следующие основные требования:

- время наработки на отказ аппарата не должно превышать длительность технологической эксплуатации;
- уровень статических и динамических механических воздейст-

вий не должен превышать критический, при котором происходит загорание перерабатываемого материала;

- единовременная загрузка аппарата, у которого имеется наибольшая вероятность возникновения взрыва, должна быть такой, при которой обеспечивается локализация взрыва в защищенном помещении;
- с целью исключения взрыва или снижения его эффекта аппараты, емкости, транспортные системы должны иметь статическое и динамическое ослабление в элементах конструкции, чтобы по возможности не допустить перехода горения во взрыв (детанацию);
- фаза производства и оборудование, соединенные в непрерывный технологический поток, должны быть надежно отделены от мест концентрации взрывчатых материалов. Это может быть выполнено как за счет дискретности производства, так и посредством аврийного раскрытия и отсечения массопотоков.

Выполнение этих требований, предъявляемых к организации технологических процессов и используемого оборудования, является гарантией обеспечения безопасной работы. Однако в ряде случаев это связано с объективными трудностями: отсутствием ряда исходных данных о свойствах перерабатываемых материалов, невозможностью оценить достоверность и надежность принятых технологических режимов эксплуатации оборудования и т. п. В связи с этим в производственных условиях нельзя полностью исключить возникновение аварийных ситуаций. Поэтому для защиты обслуживающего персонала и оборудования утверждены правила устройства и эксплуатации производств. Определены нормы загрузки, категорийность, расстояния между зданиями, системы контроля и управления за технологическими процессами и т. п.

Особое значение в защите обслуживающего персонала имеют вывод людей с опасных участков производства и его полная автоматизация.

Обязательным условием при проектировании оборудования является обеспечение его достаточной прочности. При несоблюдении этого важнейшего условия во время его эксплуатации возможны разрушения и поломки, приводящие к загораниям и взрывам. Оборудование в производстве промышленных ВВ может одновременно подвергаться различным механическим, тепловым и химическим воздействиям.

Для безопасной эксплуатации оборудования важное значение имеет механическая прочность применяемых материалов. Расчет ведется таким образом, чтобы не допускать при работе оборудования возникновения остаточных деформаций, вызываемых нагрузками. Нагрузки могут быть статическими и динамическими, ударными и знакопеременными, сосредоточенными и распределенными. Наиболее опасны-

ми являются ударные и знакопеременные силовые нагружения. При конструировании определяют характер нагрузок, их направление и величину, причем необходимо исходить из самых неблагоприятных условий эксплуатации оборудования.

При определении запаса прочности необходимо учитывать все факторы. Иногда бывает трудно определить возможные нагрузки, особенно при динамичеких нагрузках, и поэтому запас прочности дополнительно увеличивают.

Рассчитывая на прочность детали машин и аппаратов, следует стремиться к тому, чтобы все детали (кроме сменяемых и предохранительных устройств) имели одинаковый запас прочности и долговечности. Если не соблюдать этого требования, то окажется, что одни детали выйдут из строя раньше других, и повышенная прочность остальных не будет иметь смысла.

Кроме того, следует учитывать, что при длительном воздействии знакопеременных нагрузок материал разрушается при напряжениях меньших, чем предел прочности. Это явление называется усталостью материала. Трещины при этом возникают в местах концентрации напряжений. Поэтому конструкторы стараются придавать деталям по возможности плавные очертания, не допускать резких переходов поперечных сечений. Грубая обработка поверхности детали также может вызвать появление трещин усталости, поэтому ответственные части оборудования после обработки шлифуют или даже полируют. Установлено, что в отдельных случаях полированные детали могут выдерживать знакопеременные нагрузки в полтора-два раза бóльшие, чем грубо обточенные.

При конструировании деталей, нагружаемых знакопеременными нагрузками, их расчет на прочность делается с учетом предела выносливости материала.

В теле деталей технологического оборудования могут быть дефекты, возникшие в процессе изготовления и незаметные снаружи: трещины, раковины, включения и другие нарушения структуры материала. Они представляют большую опасность, так как уменьшают прочность конструкции. Такие дефекты должны выявляться с помощью методов дефектоскопии (рентгеновский контроль, ультразвуковая и гамма-дефектоскопия и т. п.) при приемке оборудования от предприятия-изготовителя.

Во избежание загорания перерабатываемого материала в оборудовании должно быть предусмотрено:

- наличие гарантированных зазоров между рабочими органами (мешалками, шнеками и т. п.) и корпусом, где они помещаются;
- наличие устройств, предохраняющих аппарат от попадания в него посторонних предметов;
- отсутствие в аппаратах застойных зон, где может неконтролируемо долго задерживаться взрывчатое вещество;

- отсутствие возможности пробкообразования, например, в шнековых прессах.

Некоторые вещества, используемые в составах ПВВ, обладают повышенной коррозионной активностью (например, растворы окислителей). Меры противокоррозионной защиты разнообразны и зависят от условий производственного процесса и конструкции оборудования; при этом важное значение имеет правильный подбор конструкционных материалов. Чаще всего для оборудования, используемого в производстве ПВВ, применяются коррозионно-стойкие стали различных марок.

Герметизация оборудования является одним из важнейших условий предупреждения пожаров и взрывов. Необходимо обеспечивать непроницаемость стенок и соединений аппаратов и трубопроводов, в которых содержатся порошки, жидкости и газы. Если герметизация плохая, то могут быть утечки из аппаратов и коммуникаций в окружающую среду или подсос воздуха в аппаратуру, находящуюся под вакуумом. В том и другом случаях при определенных условиях может произойти взрыв или пожар. Герметичность оборудования должна проверяться как при его установке, так и в процессе эксплуатации по существующим методикам.

При конструировании оборудования для работы с ВВ необходимо также следить за тем, чтобы в аппаратах, трубопроводах и арматуре не образовывались места, где при остановке оборудования на ремонт могут оказаться остатки ВВ или его компонентов.

10.2. Причины аварий в производстве взрывчатых материалов [1, 2, 6, 7]

Для правильного определения методов борьбы с взрывами важно знать основные причины, приводящие к возникновению взрыва оборудования и определяющие характер его развития. Эти данные могут быть получены из анализа причин аварий в различных производствах взрывчатых материалов и изучения наиболее потенциально опасных узлов оборудования, где возможно возникновение очагов загорания.

Статистический анализ результатов аварий в различных производствах взрывчатых материалов (ВВ, порохов, твердых ракетных топлив, пиротехнических составов) за период 1970–1980 гг. показал [1,6], что основные причины, приведшие к ним, распределяются следующим образом, %:

Ошибки обслуживающего персонала 30–35
Неудовлетворительное содержание и неисправность оборудования 25–30

Конструктивные недостатки оборудования и несовершенство технологических процессов 8–10
Непосредственные механические воздействия на взрывчатый материал при ручных операциях 10–12
Прочие причины (статическое электричество, попадание посторонних предметов, неизученность свойств взрывчатых материалов и т. п.) 15–30

Анализ непосредственных причин, приводящих к возникновению начального очага загорания, показывает, что главной причиной являются механические воздействия на ВВ при импульсных и длительных нагрузках. Причины загорания располагаются в такой последовательности, %:

Механические воздействия 65–90
Разряд статического электричества 5–30
Термическое разложение 5–10

Понятно, что большинство исследований, связанных с изучением возможных причин возникновения начального очага загорания, посвящено изучению чувствительности к механическим воздействиям.

Общепризнанная теория взрывного превращения в конденсированных ВВ при различных способах инициирования (в том числе при механических воздействиях) была разработана советскими учеными Н.Н. Семеновым, Ю.Б. Харитоном, Я.Б. Зельдовичем, Н.А. Холево, К.К. Андреевым, А.Ф. Беляевым, В.К. Бобылевым и др. При механическом инициировании механизм развития взрывного превращения можно представить следующим образом. Вначале механическое воздействие, затем разогрев в сжатом веществе с развитием взрывного процесса и выход в несжатое вещество.

Следует отметить, что рассмотренную схему развития взрыва трудно связать с конкретными условиями производства ВВ применительно к проблеме взрывозащиты оборудования. В результате проведенных исследований В.К. Бобылева, И.Я. Петровского, И.В. Мильчакова, Б.Н. Кондрикова, Б.С. Светлова, Г.А. Нишпала, С.Е. Малинина было предложено рассматривать аварии в развитии по стадиям (табл. 10.1) с учетом как свойств ВВ, так и внешних факторов (конструкции аппарата, особенностей технологического процесса). В таблице представлены стадии развития взрыва и необходимые условия возникновения данной стадии.

В конструкциях аппаратов и машин, используемых в производстве промышленных ВВ, практически всегда присутствуют неустранимые потенциальные очаги загорания. К ним можно отнести многие конструктивно необходимые узлы, например, загрузочные и разгрузочные

Таблица 10.1

Схема развития аварии в аппаратах

Стадия развития взрыва	Необходимые условия развития стадии
Возникновение очага загорания	Удар, трение, тепловой нагрев, разряд статического электричества и другие источники энергии
Горение ния	Обеспечение критических значений параметров (давление, скорость горения, удельная теплота горе- в зоне начального очага)
Переход во взрыв или детонацию	Образование ударной волны (УВ) или волн сжатия (скорость изменения давления во времени, градиент давления)
Детонация	УВ с параметрами интенсивности и экстенсивности выше критических значений. Диаметр заряда выше критического

устройства, элементы нагрева и охлаждения, сальниковые устройства для защиты вращающихся валов, электродвигатели, вибрирующие элементы, решетки и др. Все эти элементы являются неотъемлемой составной частью большинства технологических аппаратов.

Весьма распространенным видом теплового импульса воспламенения является электрическая искра. Чтобы предупредить образование электрических искр и других импульсов воспламенения, во взрывоопасных помещениях устанавливают только взрывозащищенное электрооборудование или его размещают в отдельном помещении.

Импульсы воспламенения могут возникнуть от соприкосновения с нагретыми телами. Валы, подшипники и другие трущиеся части оборудования могут нагреваться до температуры, достаточной для воспламенения ВВ, пыли или летучих веществ. Поэтому во взрывоопасных помещениях в оборудовании вместо подшипников скольжения применяют подшипники качения, не искрящиеся шестерни из цветных металлов или композиционных материалов; обеспечивается обильное смазывание трущихся поверхностей, постоянный контроль за работой смазывающихся устройств и температурой трущихся частей.

Нагревание поверхностей оборудования может происходить в результате нарушения технологического режима. Очевидно, что строгое соблюдение технологических регламентов и контроль за температурой определенных частей оборудования могут устранить эту опасность.

Механизм горения ВВ, переход горения в детонацию, условия и параметры детонации достаточно полно рассмотрены в научной литературе [1, 3].

Переход горения ВВ в детонацию может происходить при определенном (критическом) давлении образующихся при горении газообразных продуктов.

После воспламенения массива ВВ в зависимости от глубины прогретого слоя и времени действия внешнего источника тепла процесс горения может затухать или перейти в стационарное горение при условии, что теплоотвод сравняется с теплоподводом. Если теплоотвод по каким-либо причинам меньше теплоподвода за счет химической реакции горения, то скорость горения, которая была меньше скорости звука в исходном ВВ, с повышением давления возрастает. При этих условиях горение, достигнув определенных критических условий, скачкообразно переходит во взрыв.

Если горение ВВ перешло в детонацию, то последнюю, как правило, никакими конструктивными решениями прервать не удастся. Можно только ослабить силу разрушения; к сожалению, большего современная техника сделать не в состоянии.

Возникающее в аппарате давление детонации

$$p = \frac{\rho D^2}{4},$$

где ρ – плотность массы ВВ; D – скорость детонации.

Несложные расчеты показывают, что для большинства ПВВ давление на фронте детонационной волны достигает 1–4 ГПа в зависимости от состава взрывчатого вещества.

Время, которое необходимо для подъема давления до критического значения, очень мало и достигает 10–30 мс. Поэтому мероприятия, которые должны быть проведены для обеспечения взрывозащиты, должны уложиться в указанный (крайне малый) отрезок времени. Это может быть решено следующими путями:

- снабжение аппарата вышибными поверхностями, благодаря которым сбрасывается давление (часто это единственный способ ослабить последствия взрыва);
- введения в рабочую зону аппарата охлаждающих или пламегасящих средств, которые быстро тушили бы очаг возгорания;
- сочетанием этих двух способов.

Для правильного выбора того или иного метода и способа взрывозащиты необходимо знать и учитывать основные параметры взрыва: давление и температуру взрыва, скорость нарастания давления, скорость распространения пламени. Подробные методики расчета этих параметров взрыва приводятся, например, в работах [1, 3].

10.3. Основные требования взрывобезопасности конструкций аппаратов [1, 2, 6, 7]

Общие требования к конструкциям взрывоопасных аппаратов. При разработке конструкций оборудования необходимо соблюдать требования общих государственных стандартов, а также отраслевых Правил

[1, 2, 7] и Правил защиты от статического электричества. Кроме этого, конструкция должна соответствовать ГОСТ 12.1.010-78 «Взрывобезопасность».

Для снижения вероятности возникновения загорания и развития взрыва при конструировании оборудования для приготовления промышленных ВВ необходимо:

- исключить возможность местных и общих перегревов материала в аппарате, возникновения явлений типа «тепловой взрыв», т.е. само ускорение химических реакций в локальных рабочих зонах, а также мест с застойными зонами продукта;
- исключить возможность появления во время работы или чистки аппарата недопустимых силовых воздействий на ВВ, например, ударов, чрезмерного трения, а также случайного изменения требуемых размеров зазоров сопрягаемых узлов и деталей, например между шнеком и втулкой;
- обеспечить полную герметизацию всех мест соединений (фланцевых и др.) и исключить возможность появления в них зазоров или щелей, в которые могли бы проникнуть взрывчатые материалы (например, при смещении деталей, крепящих болтов и т.п.). Во избежание попадания ВВ в резьбовые соединения заменить их на бандажно-болтовые, хомутовые, гидростяжные, обеспечивающие возможность их дистанционного разъема;
- материал сальников и смазок деталей должен не образовывать взрывоопасных смесей, не взаимодействовать с перерабатываемым ВВ;
- исключить попадание в аппарат посторонних предметов. Желательно, чтобы сальники и подшипники были вынесены из рабочей зоны, в которой находится взрывчатый материал.

При конструировании отдельных узлов взрывоопасных аппаратов должны использоваться проверенные приемы по предупреждению очагов возгорания (рис. 10.1).

Сварные соединения (рис.10.1, *а* и *б*) в зоне непосредственного контакта с ВВ должны быть стыковыми и хорошо зачищенными. Швы внахлестку не допускаются, сварные швы не должны перекрываться опорами.

Все места сопряжения двух листов металла или металлических деталей, соединяемых сваркой, должны проектироваться так, чтобы не появлялась возможность образования застойной зоны. Так, днища аппаратов привариваются к корпусу с отбортовкой. Так же следует отбортовать и отверстие под штуцер, а не вваривать его в корпус аппарата. Если по каким-либо причинам дно приходится делать конусным (рис. 10.1, *в*), то в стенке аппарата обязательно следует сделать отверстие и вывод, чтобы в случае негерметичности жидкость могла вытечь, а не скапливаться в промежуточном пространстве.

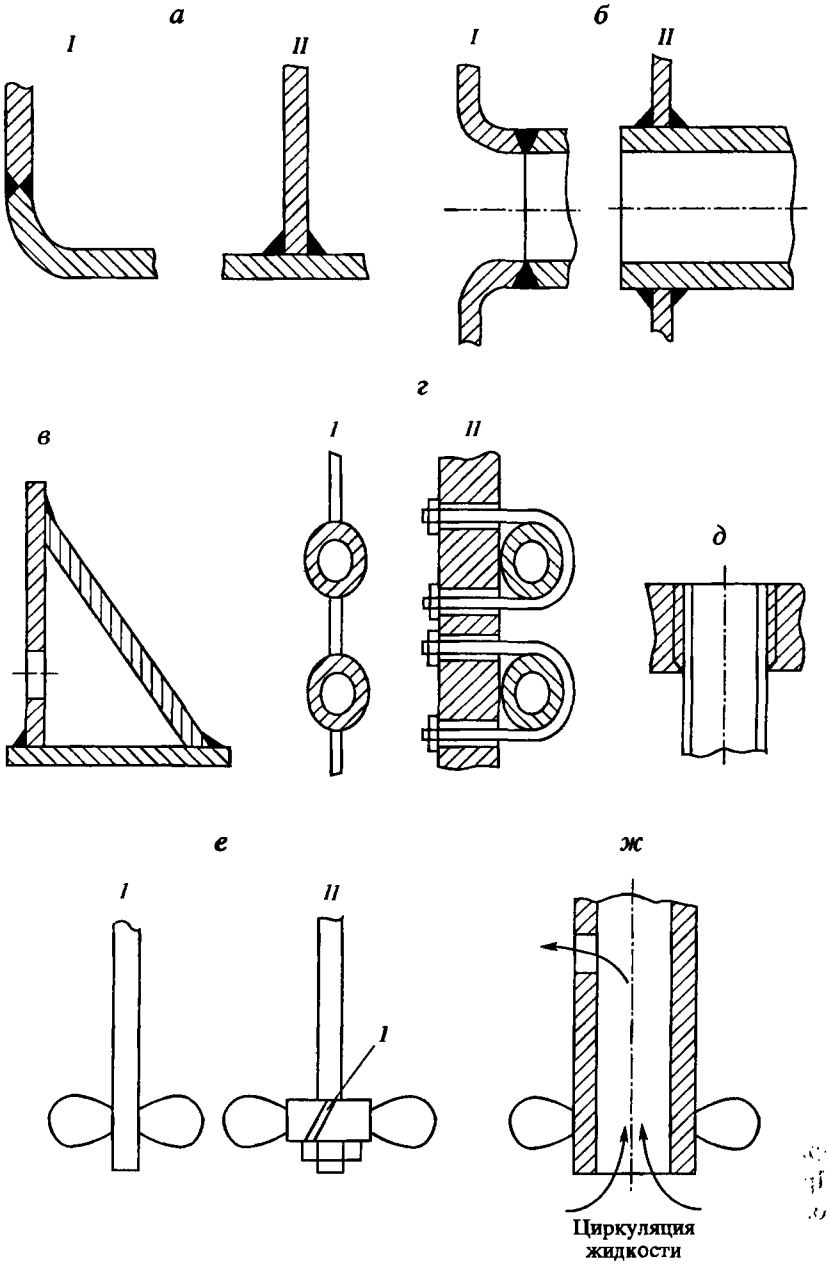


Рис. 10.1. Схемы конструкций отдельных элементов взрывоопасного оборудования:

I – образование застойной зоны; *I* – допустимо; *II* – недопустимо

Часто для нагрева или охлаждения взрывоопасной смеси или ВВ внутрь аппарата приходится вставлять змеевик, в который подается пар или вода (горячая или холодная). В этом случае змеевик (рис. 10.1, *г*) следует обязательно подвешивать, а не крепить к стенкам аппарата или поддерживающей стенке хомутами. В аппаратах часто применяют вместо змеевика рубашку. Для аппаратов, работающих с ВВ, это нежелательно, так как возможно проникновение вещества из рабочей зоны аппарата в полость между рубашкой и корпусом.

Трубы в трубной решетке (рис. 10.1, *д*) крепятся способом развальцовки, но с условием, что не будет выступающих концов трубы; поверхность решетки с трубами затем обтачивается.

Валы мешалок (рис. 10.1, *е*) следует делать цельнометаллическими. В случае если валы изготавливаются трубчатыми, в них следует делать отверстия, через которые будет выливаться перемешиваемый продукт. Лопасть мешалки следует приваривать к валу, а не крепить с помощью болтов.

К конструкциям сливных клапанов (рис. 10.1, *ж*) во взрывоопасных аппаратах предъявляются особо высокие требования. Механическое воздействие на материал, трение, возможность образования застойных зон должны быть исключены совсем или сведены к минимуму.

К приводным устройствам взрывоопасных аппаратов предъявляются следующие требования:

- взрывобезопасность, т. е. они не должны давать искры и иметь открытых поверхностей с высокой температурой нагрева;
- возможность управлять ими или осуществлять их запуск с пульта управления;
- возможность изменения и плавного регулирования угловой частоты вращения с пульта управления;
- надежность в работе.

В качестве привода применяются электро-, гидро- и пневмоприводы.

Электродвигатели применяются только во взрывобезопасном исполнении. В ряде случаев Правилами [1] запрещается установка электродвигателей в одном помещении с аппаратом. В этом случае применяют привод выносной конструкции; электродвигатель помещают в изолированное помещение, сквозь стену которого к аппарату проходит вал.

Для многих процессов получения промышленных ВВ необходимо применять аппаратуру, выполненную из специальных материалов. Правильный выбор материала является основой для успешной и долговременной работы аппарата. Все основные и вспомогательные узлы и детали аппарата, а также устанавливаемые на нем датчики, приборы, подводящие коммуникации должны быть выполнены из таких материалов, которые не взаимодействуют с приготовляемой или перерабатываемой смесью, парами и пылью компонентов.

При выборе материалов аппарата для приготовления промышленных ВВ должна исключаться возможность искрообразования в процессе работы. Это особенно важно, когда в конструкцию аппарата входят сопрягаемые движущиеся части или пара деталей, трущихся между собой.

При выборе материалов, применяемых в конструкциях взрывоопасных аппаратов, должны исключаться возможности возникновения и накопления зарядов статического электричества.

Части оборудования, соприкасающиеся со взрыво- и огнеопасными веществами, а также те, на которые может попасть пыль этих веществ, во всех случаях, когда имеется техническая возможность, должны быть выполнены из цветного материала или других материалов, не дающих искр при ударе и трении.

Важно, чтобы в конструкции аппарата была предусмотрена система, предохраняющая от попадания посторонних предметов; особенно опасны куски металла. Для этого используются металлоотсекатели.

Автоматизация сброса давления. Одним из надежных и перспективных методов взрывозащиты *аппаратов емкостного типа* является применение для быстрого сброса давления устройств мембранного типа. Основное преимущество их заключается в быстродействии; срабатывание предохранительных клапанов составляет примерно 0,1 с, а мембранных устройств 0,005 с.

Устройство состоит из предохранительной мембраны (одной или нескольких) в сборе с зажимающими элементами и применяется при отсутствии противодавления со стороны сбросной системы. Предохранительная мембрана является основным элементом устройства, разрушающимся при заданном давлении и освобождающим при этом необходимое проходное сечение для сообщения защищаемого сосуда со сбросной системой.

Расчет мембран сводится к расчету значения проходного сечения и толщины мембраны. Размеры проходного сечения мембраны зависят от объема аппарата, состава и объема газов и времени развития взрыва (скорости нарастания давления).

Мембрана должна срабатывать при давлении, превышающем рабочее не более чем на 25%. Материал мембраны выбирается исходя из свойств ВВ и параметров технологического процесса. Зная материал и диаметр мембраны, рассчитывают толщину мембраны:

для срезных мембран

$$\delta = \frac{dp_{ср}}{4\tau_{ср}},$$

где δ – толщина мембраны, d – рабочий диаметр мембраны, $p_{ср}$ – давление срабатывания мембраны, $\tau_{ср}$ – предел прочности при срезе выбранного материала мембраны;

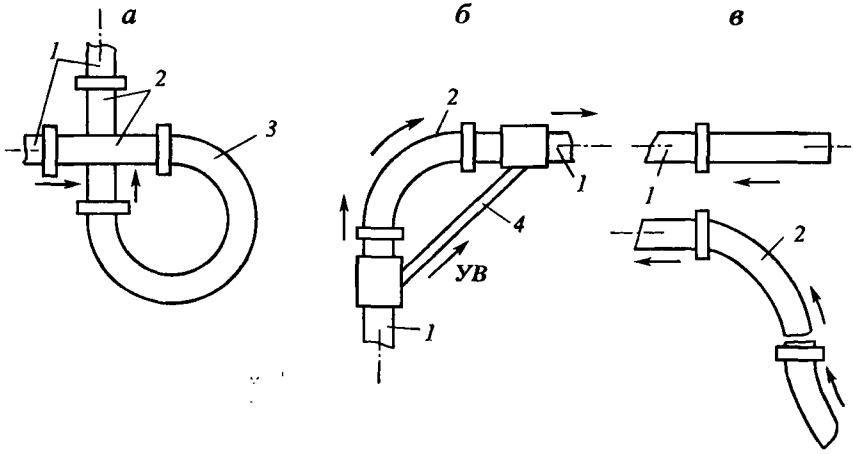


Рис. 10.2. Схемы конструкций петлевого (*а*), углового (*б*) и линейного (*в*) прерывателей детонации

для ломающихся мембран

$$\delta = \frac{d}{4}\sqrt{\frac{3p_{ср}}{2\sigma_{вр}}},$$

где $\sigma_{вр}$ – временное сопротивление при одноосном растяжении.

Прерывание возникшего детонационного процесса в трубопроводах при транспортировании порошкообразных ВВ является важной и одновременно сложной задачей. В зависимости от целого ряда требований она решается индивидуально в каждом конкретном случае. Используют несколько способов прерывания детонации, использующих петлевой, угловой, линейный и щелевой прерыватели детонации.

Петлевой прерыватель детонации представляет собой участок транспортной системы (трубопровод *1*), выполненный в виде пересекающейся петли по направлению движения ВВ (рис. 10.2, *а*). Экспериментально установлено, что для бризантных ВВ типа тротила, гексогена радиус петли *3* должен быть не менее 1 м, т. е. его длина – не менее 6 м. В качестве разрушающихся вставок *2* применяют хрупкие материалы, чувствительные к ударным нагрузкам (стекло, пластмассы, керамику).

Петлевые прерыватели, являясь очень эффективным средством прерывания детонации, обладают двумя недостатками: гормозкостью (за счет значительного радиуса петли); возможностью измельчения транспортируемого ВВ и изменения его гранулометрического состава.

В связи с последним обстоятельством область применения петлевых прерывателей детонации ограничена. Они могут применяться при транспортировании тех ВВ, к которым не предъявляются жесткие требования по гранулометрическому составу.

Действие углового прерывателя детонации (рис. 10.2, *б*) основано также на разрушении хрупких вставок *2* на линии пневмо- и вакуумтранспортных систем. При этом необходимо создать условия для опережения взрывного процесса, распространяющегося по трубопроводу *1*, ударной волной, идущей по стальному стержню *4*. Эффективность действия такого прерывателя детонации зависит, во-первых, от соотношения скоростей детонации и распространения УВ и, во-вторых, от соотношения длины участков, по которым проходят детонация и УВ, т.е.

$$\frac{l_{ст}}{c_{ст}} < \frac{l_{тр}}{D_{ВВ}},$$

где $c_{ст}$ – скорость распространения УВ по стержню, м/с; $D_{ВВ}$ – скорость детонации в транспортируемом ВВ, м/с; $l_{тр}$, $l_{ст}$ – длины соответственно трубы и стержня между разрушаемыми участками, м.

Хрупкие вставки изготовляют из материалов, аналогичных используемым материалам в петлевых вставках. Недостатком углового прерывателя детонации является ограниченность его применения, т.е. возможность применения для транспортирования только ВВ с малой (не более 2500 м/с) скоростью детонации.

Принцип действия линейного прерывателя УВ (рис. 10.2, *в*) основан на разрыве малопрочного участка трубопровода при прохождении волны из трубопровода большей прочности (рис. 10.2, *в*), например, при выходе УВ из участка со стальными стенками в участок со стенками из пластмассы. Последние разрываются, и происходит резкое падение давления в воздушной волне. Экспериментально установлено, что эффект разрушения достигается при длине ослабленного участка порядка 4–6 м (не менее).

Действие щелевого прерывателя детонации (рис. 10.3) основано на прохождении транспортируемого ВВ по кольцевому зазору, образованному двумя коаксиально расположенными цилиндрами и имеющему ширину зазора δ, меньшую чем критический диаметр детонации $d_{кр}$ транспортируемого ВВ, т. е. $\delta < d_{кр}$. Длина зазора должна быть больше расстояния передачи детонации по этому зазору. Общая площадь поперечного сечения зазора должна быть равной площади поперечного сечения трубы, чтобы обеспечивалось транспортирование ВВ с одинаковой плотностью и не возникало торможение потока в щелевом канале. При правильном выборе указанных параметров, а также

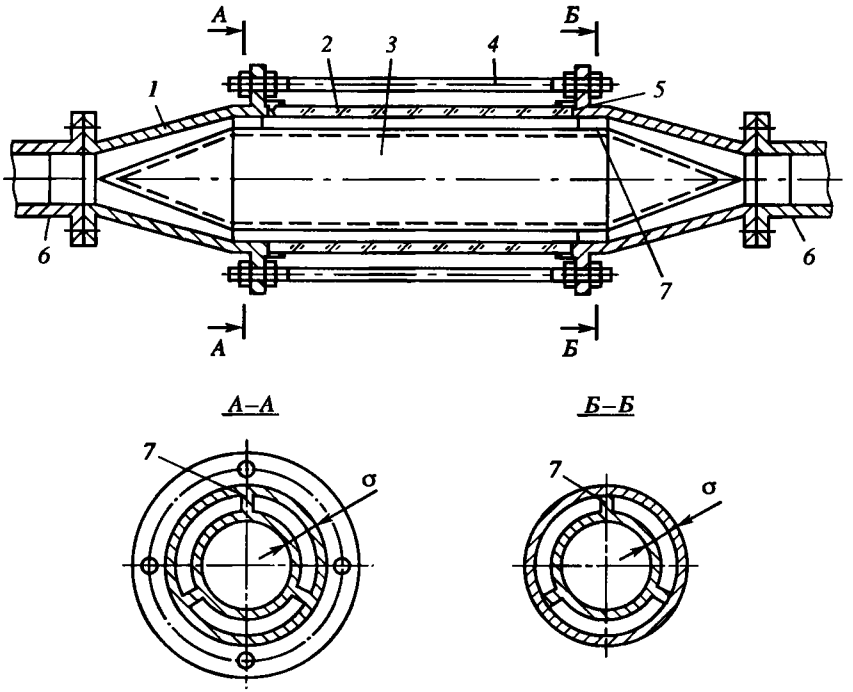


Рис. 10.3. Схема щелевого прерывателя детонации:
1 – переходник; *2* – хрупкая вставка (стекло, плексиглас, винипласт); *3* – центральное тело (сталь, пластмасса); *4* – стяжные болты; *5* – прокладка; *6* – транспортный трубопровод; *7* – ребро

материалов разрушаемых цилиндров, эта конструкция из рассмотренных (см. рис. 10.2) может оказаться наиболее эффективной.

Описанный принцип взрывозащиты трубопроводов широко применяется в производстве при пневмо- и вакуумном транспортировании смесей, отдельных компонентов в производстве промышленных ВВ.

Автоматические разборные соединения. Для быстрого соединения, сборки и разборки отдельных конструктивных элементов взрывоопасных аппаратов в автоматическом режиме используют байонетные затворы, захваты и зажимы на основе гидро- и пневмоавтоматики.

Автоматическое разборное соединение бандажно-болтового типа (рис. 10.4) применяется для крепления крышек в различного рода изложницах. Оно состоит из откидных болтов *6*, сидящих на пальцах *7* и затягиваемых с помощью колпачковых гаек *2*, под которые кладутся сухари *3*. Вся конструкция удерживается за счет кольцевого бандажа *4*. Автоматическая разборка соединения осуществляется следующим об-

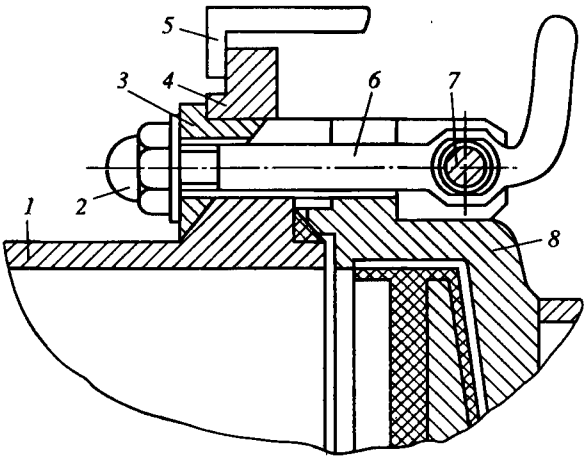


Рис. 10.4. Схема бандажно-болтового соединения:
1 – корпус; *2* – колпачковая гайка; *3* – сухарь; *4* – бандаж; *5* – захват; *6* – болт откидной; *7* – палец; *8* – крышка

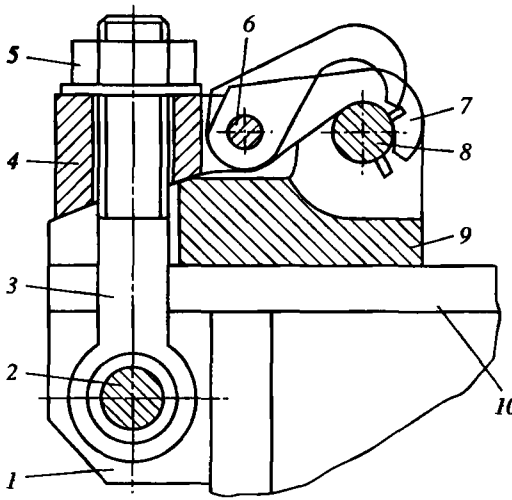
разом. С помощью захвата *5* дистанционно бандаж срывается и нажимает на хвостовик откидного болта. Болт поворачивается вокруг оси (палец *7*) и вместе с сухарем выходит из паза корпуса изложницы, обеспечивая освобождение крышки *8*, которая затем другим захватом также дистанционно сдергивается с изложницы.

На рис. 10.5 показана схема *устройства дистанционного сбрасывания болтов* с целью раскрытия корпусов шнековых и вибрационных смесителей. В этом случае корпус смесителя состоит из двух полуцилиндрических обечаек. На верхней обечайке крепится вал *8* со штырями, которые при дистанционном повороте вала откидывают сидящие на пальцах *6* захваты *7*. Болты *3* вместе с конусными шайбами откидываются, крышка *9* освобождается и может быть легко поднята.

Дистанционно управляемое устройство – *автоматический замок* (рис. 10.6) – предназначено для установки на разъемных соединениях в аппаратах объемного типа, и автоматически, по сигналу с пульта управления, снимает силовое замыкание, например, на стыке корпуса и чаши смесителя, обеспечивая тем самым его быструю разборку.

Замок состоит из корпуса гидроцилиндра *2*, в котором размещены шток *4* и поршень *3*. На том же корпусе на оси *5* установлены откидная серьга *1* с прижимным болтом 6 и возвратная пружина.

Автоматический замок работает следующим образом. При подаче масла в полость А шток *4* находится в среднем положении, упираясь в нижний край серьги *1*. При этом чаша смесителя удерживается болтом *6*. При подаче масла под давлением в полость *Б* шток отходит в крайнее правое положение и освобождает серьгу, которая под давлением



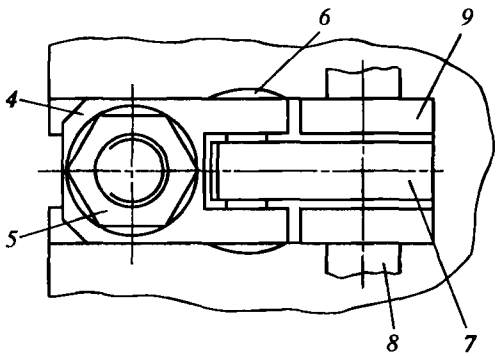


Рис. 10.5. Схема устройства дистанционного сбрасывания болтов:
1 – опорное ребро; *2* – ось; *3* – откидной болт; *4* – конусная шайба; *5* – гайка; *6* – палец; *7* – захват; *8* – вал со штырем; *9* – крышка; *10* – корпус

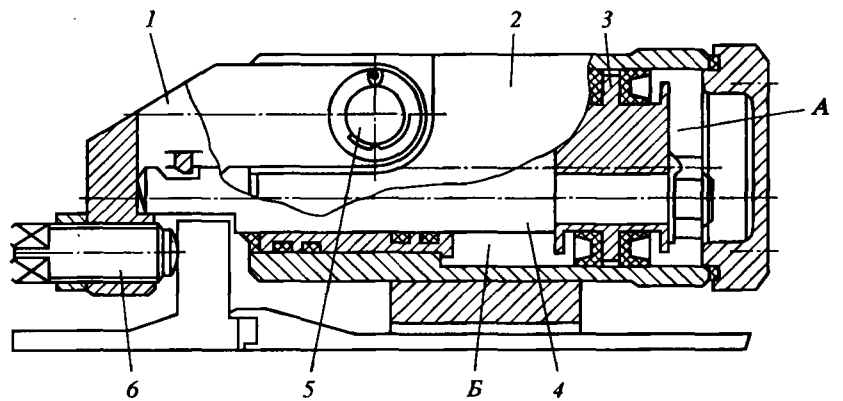


Рис. 10.6. Устройство автоматического замка для аппаратов емкостного типа:
1 – серьга; *2* – корпус гидроцилиндра; *3* – поршень, *4* – шток; *5* – ось; *6* – болт

пружины откидывается. Силовое замыкание снимается. При повторной подаче масла в полость *А* шток *4* упирается во фланец чаши и отодвигает ее на расчетное расстояние.

Работа аппаратов в автоматическом режиме. Каждый аппарат, используемый для работы с ВВ, по возможности должен иметь встроенные в него средства, обеспечивающие протекание процесса и его контроль в автоматическом режиме. В конструкции аппарата должны предусматриваться как обязательные элементы, места для установки датчиков давления, температуры и др. Желательно шире применять управляемые приводы (гидравлические и электрические), позволяющие плавно регулировать вращение валов, мешалок, винтов с пульта управления.

Основное требование к работе аппаратов – *изолировать людей* от оборудования и от всех опасных зон, связанных с его обслуживанием. Для этих целей надо использовать автоматизированные транспортные комплексы, гибкие автоматизированные модули, робототехнические устройства и т. п.

Все операции по контролю и управлению следует осуществлять только с пульта управления, используя систему АСУ ТП во всех взрывоопасных производствах.

10.4. Защита технологического оборудования от статического электричества [1, 6]

Общие сведения. Причиной значительного числа аварий (загорания и взрывов) в аппаратах и другом оборудовании для приготовления и переработки ПВВ является статическое электричество. Поэтому каждое технологическое устройство, предназначенное для работы с ВВ, должно быть полностью защищено от возможности возникновения в нем зарядов статического электричества (СЭ).

Под *статическим электричеством* принято понимать электрические заряды, находящиеся в состоянии относительного покоя, распределенные на поверхности или в объеме диэлектрика или на поверхности изолированного проводника. Перемещение зарядов СЭ обычно происходит вместе с наэлектризованными телами.

Статическое электричество образуется при трении двух диэлектриков (материалов, практически не проводящих или плохо проводящих электрический ток) или диэлектрика о металл. На поверхностях трущихся материалов могут накапливаться электрические заряды.

В случае накопления заряда выше некоторого значения может произойти электрический разряд, искра которого способна при определенных условиях вызвать воспламенение горючей смеси или взрывчатого материала. Напряженность электрического поля на диэлектриках

может достигать значения до 30 кВ/см и вызвать очень мощные искровые разряды. В производстве ПВВ это может происходить при движении пылевоздушной смеси в трубах и аппаратах при пневматическом транспортировании, измельчении, просеивании, в процессах сушки с применением ожиженного слоя, во время обработки компонентов в смесителях и т. д.

Возникающие заряды СЭ могут обладать высоким потенциалом и представлять серьезную опасность в производстве. При разности потенциалов в 3 кВ искровой заряд может воспламенить почти любой горючий газ, а при 5 кВ – также и бóльшую часть горючих пылей.

Заряды СЭ могут накапливаться и на людях. Это наблюдается в тех случаях, когда пользуются обувью с подошвами, не проводящими электричество, носят одежду из шерсти или искусственных волокон, находятся на полу, не проводящем электричество, и постоянно выполняют операции с диэлектриками.

Мерой электризации является количество электрического заряда, перешедшего с одного тела на другое в процессе их взаимодействия. Наиболее ярко способность к электризации проявляется у диэлектрических материалов.

Электрические свойства диэлектрика характеризуются удельным электрическим сопротивлением ρ, измеряемым в омах, умноженных на метр. Например, удельное электрическое сопротивление тротила находится в пределах $\rho = 10^7 \div 10^{10}$ Ом·м. Измерения удельного электрического сопротивления проводят в соответствии с ГОСТ 6433.2-71. Электризация твердых тел становится заметной, если удельное электрическое сопротивление материала превышает 10^8 Ом·м.

Одной из важных характеристик пожаро- и взрывоопасности веществ является минимальная энергия воспламенения (МЭВ), под которой понимают энергию разряда, способного воспламенить горючую смесь или взрывчатый материал. По МЭВ можно количественно охарактеризовать чувствительность ВВ к электрическим разрядам. Определение МЭВ производится экспериментально.

Для газов и паровоздушных сред применяется установка, состоящая из вакуумируемой взрывной камеры с контролирующими устройствами; в камеру напускается из баллонов испытуемая смесь. Для пылевоздушных сред (ПВС) используется установка, в которой горючее вещество распыляется с помощью вибросита; известны также методы распыления навески исследуемого материала в замкнутом объеме. По ОСТ 84-1661–79 «Метод определения МЭВ электрического разряда, воспламеняющего ПВС» предусматривается применение установок, в которых пылевоздушная смесь создается путем просеивания твердого дисперсного вещества через сито. Для определения МЭВ твердых, пастообразных и жидких веществ используются установки, в которых

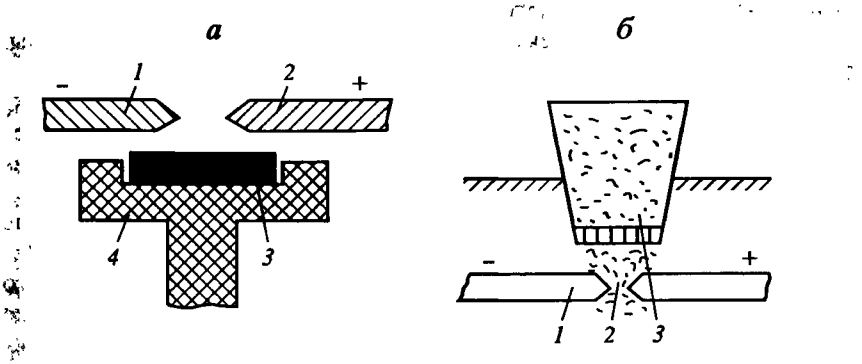


Рис. 10.7. Схема испытаний на чувствительность к искровому заряду: *а* – твердых, пастообразных, жидких; *1, 2* – соответственно подвижный и неподвижный электроды; *3* – испытуемое вещество; *4* – гнездо для установки испытуемого вещества; *б* – пылевоздушные смеси; *1* – разрядные электроды; *2* – пылевоздушная смесь испытуемого вещества; *3* – бункер с распылительной сеткой

электрический разряд проходит непосредственно над поверхностью испытуемого образца (рис. 10.7).

Наименьшей МЭВ обладают газо- и паровоздушные смеси; для аэрозолей (пылей) она примерно на порядок выше и составлет, например, для алюминия 1,4 мДж, гексогена 7–10 мДж, октогена 8–15 мДж. Для твердых ракетных топлив МЭВ еще на три порядка выше и составляет для быстрогорящих СРТТ 10–30 Дж, для обычных СРТТ 70–150 Дж, для баллиститных 150 Дж.

Необходимо отметить, что заряды СЭ не способны воспламенять вещества, имеющие МЭВ больше, чем 0,1 Дж [1,6].

Таким образом, вероятность загорания взрывчатых материалов, причиной которого является статическое электричество, возникает при следующих условиях: наличие источника электризации; заряды СЭ создают напряженность электрического поля, при которой возможно искрообразование; электрические разряды возникают в горючей среде; энергия разрядов СЭ достаточна для возгорания горючей среды. Отсутствие хотя бы одного из указанных условий делает невозможным возникновение загорания от статического электричества. На этом основаны методы защиты.

Методы защиты от статического электричества. Полностью исключить электризацию в процессе приготовления промышленных ВВ практически невозможно. Поэтому применяют методы, основанные на ограничении электризации до такого уровня, когда электрические заряды не возникают или энергия возможного электростатического разряда меньше МЭВ.

Методы снижения электризации можно разделить на две группы: технологические и конструктивные.

К технологическим методам можно отнести методы снижения электризации, основанные на изменении технологических параметров ведения процессов, а также физико-химических характеристик обрабатываемого материала.

Эффективным и распространенным методом является покрытие обрабатываемого материала поверхностно-активным веществом. Нанесение на диэлектрик ПАВ приводит к уменьшению поверхностного электрического сопротивления, что способствует более полной утечке электрических зарядов с диэлектрика. Например, для снижения электризации флегматизированного гексогена при сушке в ожиженном состоянии применяют поверхностно-активный антистатик.

Эффективной мерой является уменьшение количества окислителя, т. е. замена воздуха в оборудовании, содержащем горючий материал, азотом или диоксидом углерода (углекислым газом). Так, замена воздуха на CO_2 повышает МЭВ для октогена в 6 раз, что позволяет безопасно эксплуатировать линию пневмозагрузки этого компонента в смеситель [1,6].

В некоторых случаях, например, при переработке гидрофильных веществ, входящих в состав ПВВ, удается уменьшить интенсивность электризации повышением относительной влажности воздуха более 65%.

Уменьшение опасности от статического электричества в некоторых аппаратах успешно достигается ионизацией воздуха в местах возникновения зарядов. Для этого применяют различного типа нейтрализаторы – устройства для снятия зарядов. Чаще всего применяют радиоактивные нейтрализаторы.

Важное значение в производстве ПВВ имеет создание и применение автоматизированных средств контроля за наличием и силой разряда СЭ в технологических аппаратах и транспортных системах.

К конструктивным методам защиты относится один из основных и наиболее часто применяемых способов борьбы со статическим электричеством – заземление оборудования, емкостей и трубопроводов. При наличии заземления образующиеся за счет статического электричества заряды отводятся в землю и не накапливаются до такого значения, при котором может возникнуть искра.

Заземлению подлежат резервуары, насосы, смесители, вальцы, каландры, мельницы, грохоты, сушилки, транспортеры и т.п. В этих устройствах возможно быстрое возникновение высоких потенциалов электрических зарядов и имеются взрыво- и пожароопасные среды. Заземлению подлежит не только оборудование, но и связывающие его трубопроводы.

Другим опасным источником зарядов СЭ является сам обслуживающий персонал, поскольку энергия разряда с тела человека может достигать 50 мДж. Чтобы предупредить возникновение таких разрядов, нужно обеспечить быструю их утечку. Для этого в тех производствах, где существует опасность воспламенения горючих смесей разрядом с тела человека, необходимо обеспечивать работающих электропроводной обувью и предусматривать устройство электропроводных полов.

Распространенным способом защиты от образования зарядов СЭ является подбор контактных пар. В основе этого метода лежит способность материала электризоваться при контакте с различными телами. Так, в линии загрузки тонкодисперсного порошка алюминия в смеситель применяют трубопровод, состоящий из чередующихся резиновых и металлических царг. Это позволяет практически полностью устранять заряды на порошке, поступающем в смеситель, так как на разных участках трубопровода порошок алюминия электризуется противоположными по знакам зарядами. Основной трудностью при использовании метода контактных пар является поиск электропроводного материала, электризующего компоненты ПВВ положительно.

Одним из наиболее радикальных методов борьбы со статическим электричеством является применение в конструкциях аппаратов специальных электропроводных материалов (резин, пленок, шнуров и т.п.). Особенностью этих материалов является то, что в их состав введены различные антистатические добавки, например, сажа, графит, диоксид титана, металлические порошки, которые придают этим материалам электропроводные свойства. Электропроводные материалы обеспечивают отвод образующихся зарядов СЭ и исключают возможность искровых разрядов с поверхности оборудования и перерабатываемого материала. Для этого они должны иметь удельные электрические сопротивления, не превышающие 10^4 Ом·м.

В заключение следует отметить, что возникновение начального загорания при производстве многих ВВ можно полностью исключить, соблюдая отраслевые правила по защите от СЭ. В каждом производстве, где оно может возникнуть, применяют в зависимости от технологических особенностей свою систему мер защиты, изложенную в технических нормативах и инструкциях по технике безопасности. Эти требования должны точно выполняться при проектировании и эксплуатации оборудования.

10.5. Противопожарная защита технологического оборудования [1, 2, 6, 7]

Почти любая фаза производства ПВВ является пожароопасной. Поэтому все оборудование, а также целые участки производства, компону-

емые из различного оборудования, должны снабжаться активными средствами пожарной защиты, обеспечивающими автоматическую ликвидацию очага загорания. Средства пожарной защиты должны быть заложены непосредственно в конструкцию оборудования еще на стадии его проектирования.

Разработаны основные принципы пожарной защиты и на их основе – системы пожаротушения и локализации отдельных очагов загорания в оборудовании. Все эти разработки обобщены и оформлены в виде официальных отраслевых руководств по устройству и эксплуатации систем автоматической пожарной защиты (АПЗ).

Система АПЗ – это комплекс устройств, обеспечивающих автоматическую подачу огнетушащего вещества при возникновении пожара и состоящих из одного или нескольких технологических модулей.

К средствам АПЗ относятся:

- быстродействующая автоматическая пожаротушащая система (БАПС);
- система локализации пожара;
- системы, предназначенные для подавления и отсечки пламени в закрытых трубопроводах (средства пламеотсечения).

Главным условием успешного подавления очага загорания, а в ряде случаев и взрыва, является быстродействие системы АПЗ, т.е. время подачи в аппарат огнетушащего средства для предотвращения образования большой зоны горения должно быть минимальным.

По быстродействию системы АПЗ подразделяются на сверхбыстродействующие (время срабатывания до 0,1 с), быстродействующие (1–3 с) и инерционные (10–30 с).

Для оборудования, предназначенного для работы с взрывчатыми материалами, могут применяться только две первые системы.

Система АПЗ должна обеспечивать обнаружение очага загорания и подачу огнетушащего средства на защищаемый объект. Дополнительно к этому она должна: останавливать технологический процесс при возникновении очага загорания и выдавать сигналы о пожаре в аварийные службы; предотвращать распространение пламени от одного аппарата к другому с помощью пламеотсекателей, огнепреградителей, водяных завес и т.п; обладать высокой эффективностью за счет применения двух независимых приводов – основного и дублирующего; иметь возможность контролировать работоспособность основных узлов во время эксплуатации и распознавать ложные сигналы об аварии.

Быстродействующая автоматическая пожаротушащая система представляет собой комплекс отдельных модулей, состоящих из насадков-распылителей, орошающих зону горения распыленным огнетушащим веществом (водой), пневмогидромеханического оборудования (водовоздушный бак, пусковые и обратные клапаны, пожарные насосы, задвижки и т. д.) и средств автоматического и ручного пуска.

Все модули БАПС имеют общий источник водоснабжения (водовоздушный бак, производственный водопровод, резервуары, из которых вода подается специальными пожарными насосами).

Быстродействие системы обеспечивается специальными датчиками, весьма чувствительными к открытому пламени горящего вещества, и приводами пусковых клапанов, открывающими доступ воды к объекту загорания одновременно с появлением аварийного сигнала от датчиков.

Данная БАПС является системой многократного действия, т.е. по окончании пожара она вновь сравнительно легко приводится в рабочее состояние. Система обладает весьма гибкой компоновкой составляющих ее элементов в зависимости от их назначения. Выбор схемы компоновки определяется конструкцией оборудования и здания, особенностями технологического процесса, а также возможностью распространения пожара внутри защищаемой зоны.

Средства пламеотсечения предназначаются для предотвращения распространения горения взрывчатого материала по транспортным коммуникациям. В большинстве случаев они основываются на применении ограничителей распространения пламени различных огнепреградителей и предохранительных затворах.

Конструкции различных типов пламеотсекателей, используемых в производстве взрывчатых материалов, можно найти в работах [1, 6].

Литература

1. *Смирнов Л.А., Нишпал Г.А., Волков Л.В.* Основы проектирования взрывозащищенного технологического оборудования. – М.: ЦНИИНТИ, 1987. – 196 с.

2. *Забелин Л.В., Гафиятуллин Р.В., Кузьмицкий Г.Э.* Защита окружающей среды в производстве порохов и твердых ракетных топлив. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 174 с.

3. Промышленные взрывчатые вещества на основе утилизируемых боеприпасов: Учеб. пособие для вузов/Под общ. ред. Ю.Г. Щукина. – М.: Недра, 1998. – 319 с.

4. *Горст А.Г.* Пороха и взрывчатые вещества. – М.: Машиностроение, 1972. – 208 с.

5. *Светлов Б.С., Яременко Н.Е.* Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. – М.: Недра, 1973. – 216 с.

6. Теория и практика взрывобезопасности энергоемких материалов/Под общ. ред. Г.А. Нишпала – М.: ЦЭИ «Химмаш», 2002. – 140 с.

7. *Забелин Л.В.* Технологическая безопасность в производстве порохов. – М. ООО «Недра – бизнесцентр», 2002. – 143 с.

ГЛАВА 11

ЭКОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

11.1. Токсичность промышленных взрывчатых веществ и их компонентов [1, 2]

Аммиачно-селитренные ВВ. Среди ПВВ наиболее широкое применение находят аммиачно-селитренные ВВ (АСВВ). Анализ их составов АСВВ показывает, что практически все компоненты обладают токсическими действиями на человека. Аммиачно-селитренные ВВ, представляющие собой механические смеси различных токсичных ВВ, сами токсичны. При обращении с ними необходимо защищать органы дыхания, слизистые оболочки и кожу от пыли.

Практически все АСВВ в качестве основного компонента содержат *аммиачную селитру.* Ее получают взаимодействием аммиака и азотной кислоты.

Токсическое действие *аммиачной селитры* сходно с действием аммиака. Симптомами отравления аммиачной селитрой является раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей. Кроме того, иногда у работающих с ней длительное время возникают хронический гастрит, холецистит и гепатохолецистит. Она оказывает раздражающее действие на кожу, что выражается в сильном зуде, покраснении фолликулов, лишаевидном утолщении кожи и покраснении ее на тыльной стороне кистей и предплечьях. Попадая в мелкие ранки или трещины, вызывает жгучую боль.

Нитраты калия, натрия, кальция (калиевая, натриевая, кальциевая селитры) вызывают у персонала, непрерывно работающего с ними без средств защиты, болезненные ощущения при надавливании утолщений кожи, которые даже после прекращения работы через длительный промежуток времени могут перейти в раковые опухоли. Способность нитратов восстанавливаться в организме в нитриты часто приводит к образованию метгемоглобина. При употреблении в пищу воды, содержащей 50–160 мг/л нитратов, резко повышается содержание метгемоглобина в крови. В связи с этим при работе с этими веществами необходимо защищать органы дыхания и кожу.

Тротил в организм человека может попадать в виде пыли и паров через органы дыхания, кожу и пищеварительный тракт, вызывая острые и хронические отравления. Он воздействует на печень, кровь, нервную систему. При длительном воздействии возникает профессиональная катаракта. К местному воздействию тротила на организм человека относится раздражение слизистых оболочек и верхних дыхательных путей. Тротил может вызывать экземы, эритемиты и дерматиты. В связи с этим необходимо предотвращать попадание тротила на открытые участки кожи, глаза, слизистые оболочки, в органы дыхания и пищеварения, применяя спецодежду и средства индивидуальной защиты согласно отраслевым нормам, а также соблюдать правила личной гигиены. При попадании пыли ВВ в глаза или на кожу необходимо смыть ее большим количеством воды. При раздражении дыхательных путей рекомендуется полоскание горла 2–3%-ным раствором пищевой соды.

По степени вредного воздействия на организм человека тротил относится ко второму классу (вещество высоко опасное). Предельная допустимая концентрация (ПДК) пыли тротила в воздухе рабочей зоны составляет 0,5 мг/м^3.

Алюминий в состав порошкообразных, гранулированных ВВ вводят в виде мелкодисперсного порошка. Попадание его в организм человека возможно на стадии производства ВВ или его применении, в результате неполной детонации совместно с другими продуктами взрыва.

Общий характер действия алюминиевого порошка на организм человека заключается, с одной стороны, в механическом раздражении легочной ткани, а с другой – в осаждении белков и образовании необратимых белковых соединений в виде волокнистых субстанций без признаков воспаления.

При вдыхании пыли алюминия поражаются главным образом легкие. Заболевание называется алюминозом легких. После попадания частиц алюминия в глаза наблюдаются очаговые омертвления, изменения пигментации роговицы и капсулы хрусталика, помутнение стекловидного тела. Пыль алюминия раздражает слизистые глаза, носа, рта и др. ПДК алюминия и его сплавов в воздухе рабочей зоны 2 мг/л.

Гексоген при работе с ним требует применения индивидуальных средств защиты от попадания пыли на кожные покровы, слизистые оболочки и проникновения ее в органы дыхания и пищеварения (респиратор, спецодежда), а также соблюдения правил личной гигиены. ПДК пыли и аэрозолей гексогена в производственных помещениях 1 мг/м^3, в воде – 0,1 мг/л.

В качестве ПВВ применяют флегматизированный гексоген (состав А-IX-1) и механическую смесь флегматизированного гексогена с алюминиевой пудрой (состав А-IX-2). Токсичность этих составов обусловлена токсичностью входящих компонентов.

Нитраты целлюлозы также токсичны. Солнечный свет и ультрафиолетовые лучи, действуя на нитраты целлюлозы продолжительное время, разлагают их, особенно в присутствии влаги. Даже при обычной температуре (15...20 °С) нитраты целлюлозы медленно разлагаются. При этом выделяется оксид азота NO, который на воздухе окисляется в диоксид азота NO_2, а последний, соединяясь во влажной атмосфере с водой, образует азотную и азотистую кислоты. ПДК оксидов азота в рабочей зоне производственных помещений 5 мг/м^3, а в атмосферном воздухе населенных пунктов максимальная разовая – 0,3 мг/м^3, среднесуточная – 0,1 мг/м^3.

Промышленные ВВ из утилизируемых боеприпасов. В процессе заряжания скважин *тротил-У* выделяет вредную для организма человека и взрывоопасную пыль тринитротолуола. ПДК ее в воздухе рабочей зоны – 0,5 мг/м^3; нижний предел взрывоопасной концентрации аэрозоля – 12 г/м^3; минимальная энергия зажигания пылевоздушной смеси – 2,9 мДж.

При работе с *гранипорами* в воздух может выделяться пыль, вредная для здоровья работающих. ПДК пыли в воздухе составляет 0,1 мг/м^3, а минимальная энергия воспламенения (МЭВ) – 1 Дж.

Диабазит является взрывоопасным и токсичным веществом. При соприкосновении с кожей лица и рук он вызывает головные боли. Поэтому при производстве работ необходимо пользоваться респираторами и перчатками. ПДК в воздухе – 0,02 мг/м^3.

Предельно допустимые концентрации, кг/м^3, отдельных веществ, которые могут входить в состав ПВВ, в атмосфере следующие [2] (единовременный/среднесуточный максимум):

Твердые частицы (пыль)	0,5/0,15
Сажа	0,15/0,05
Углеводороды	0,03/0,005
Хлористый натрий	–/0,15
Хлопковая пыль	0,5/0,05
Перхлорат аммония	1,0/–
Октоген (гексоген)	1,0/–
Алюминий (пыль)	2,0/–

Предельно допустимые концентрации, мг/л, некоторых веществ в водоемах для общественного и бытового использования следующие:

Аммиачная селитра	2,0
Лигнин	1,6
Ионы нитратов	10,0
» нитритов	1,0
Хлористый натрий	350
Перхлорат аммония	5,0
Октоген (гексоген)	0,1

11.2. Условия безопасного применения промышленных взрывчатых веществ [1–4]

Большое значение имеет классификация ВВ по назначению и условиям безопасного применения в горнодобывающей промышленности и строительстве.

С этой точки зрения ВВ, различные по физическому состоянию и составу, разделяют на восемь классов (I–VII и специальный класс) по возможности применения для взрывных работ в тех или иных определенных условиях [3, 4].

Согласно этой классификации, по условиям применения ВВ подразделяют на непредохранительные, предохранительные и специальные (специального назначения).

Непредохранительные ВВ используются для взрывных работ только на земной поверхности и в забоях подземных выработок, в которых отсутствует выделение горючих газов и пыли, либо применяется инертизация (например, заполнение инертным газом) прилегающего к забою пространства, исключающая воспламенение взрывоопасной среды при взрывных работах (классы I–II).

Предохранительные ВВ используются для взрывных работ в шахтах и подземных рудниках с пылегазовым режимом (классы III–VII).

Взрывчатые вещества *специального назначения* (класс С – специальный) и изделия из них используются для специальных взрывных работ, кроме забоев подземных выработок, в которых возможно образование взрывоопасной концентрации метана и угольной пыли.

Промышленные ВВ I класса применяются для взрывных работ только на земной поверхности при открытых работах. Этот класс включает следующие наиболее часто используемые сыпучие ПВВ: гранулотол, аммонит 6ЖВ, аммоналы М-10 и скальный № 3, детонит М, а также водосодержащие ВВ: акватолы, карбатолы, акваналы.

В зависимости от вида работ (сухие и обводненные скважины, шурфы, траншеи, шпуры) ВВ в момент заряжания могут находиться в порошкообразном состоянии насыпью в мешках или в полиэтиленовых пакетах, гранулированном виде для механизированного и ручного заряжания или в виде густой суспензии (геля) для литьевого заряжения водосодержащих ВВ.

Промышленные ВВ этого класса могут быть заводского изготовления или производиться на стационарных и передвижных пунктах, расположенных в непосредственной близости к местам потребления.

Промышленные ВВ II класса применяют на открытых и подземных работах в шахтах и рудниках, не опасных по взрыву газа и пыли. Этот класс состоит из патронированных порошкообразных ВВ (аммонит 6ЖВ; аммоналы: 200, М-10, скальный № 1, скальный № 3; детонит

М), гранулированных ВВ (граммонит 79/21; гранулиты: АС-4, АС-4В, АС-8, АС-8В, М, АС-М, С-2; акванал АРЗ-8Н) для заряжания механическим (пневматическим) и ручным способами, а также из порошкообразных ВВ в насыпном состоянии в мешках (аммонит 6ЖВ).

Промышленные ВВ II-го класса обычно используют для взрывов в сухих и обводненных скважинах и шпурах на очистных и проходческих работах. Кроме того, к этому классу относятся водонаполненные ВВ (акванал) жидкой консистенции, удобные для заряжания нисходящих шпуров.

Для взрывных работ в шахтах, опасных по взрыву газа или пыли, используются предохранительные ВВ, которые по степени безопасности составляют III–VII классы. К каждому классу предохранительных ВВ предъявляются свои технические требования, определяемые химическим составом атмосферы в шахте, газоносностью добываемых полезных ископаемых, возможностью внезапных выбросов газа, характером взрывных работ, горно-геологическими особенностями выработок и другими факторами, влияющими на возникновение взрывоопасных ситуаций. Выполнение этих требований обеспечивается соответствующей рецептурой ВВ, конструкцией заряда и технологией изготовления. Например, могут варьироваться количество, химическая природа и размер частиц пламегасителя, изменяться плотность и размеры заряда.

Предохранительные ВВ, как и большинство промышленных ВВ, являются смесевыми сыпучими материалами; их патронируют в бумажные или полиэтиленовые оболочки диаметром 32, 36, 38 мм. Предохранительные ВВ размещают в шпурах; способ заряжания – ручной.

Промышленные ВВ III класса представлены аммонитом АП-5ЖВ; он содержит водоустойчивую аммиачную селитру, тротил и хлорид натрия, используется для взрывных работ только по породе в забоях подземных выработок, в которых имеется выделение метана и отсутствует взрывчатая пыль.

Промышленные ВВ IV класса составляют аммониты: Т-19, ПЖВ-20, в которых содержится больше пламегасителя, чем в аммоните АП-5ЖВ. Эти ВВ применяются для шпуровых зарядов в сухих и мокрых угольных и смешанных забоях, опасных по взрыву метана и пыли (кроме забоев, отнесенных к особо опасным), а также зарядов в скважинах при вскрытии угольных пластов с помощью взрыва.

Промышленные ВВ V и VI классов представлены соответственно угленитами Э-6 и 12ЦБ.

В состав угленита Э-6 входят хлорид аммония и натриевая селитра, сенсибилизированные жидкими нитроэфирами. При взрыве угленита Э-6 образуется хлорид натрия в ультрадисперсном состоянии. В качестве дополнительного пламегасителя в нем содержится небольшое количество хлорида калия.

В составе угленита 12ЦБ содержится смесь карбамида и натриевой селитры, сенсибилизированная нитроэфирами. При взрыве угленита 12ЦБ образуются диоксид углерода (углекислый газ), вода и азот. Для усиления предохранительных свойств в состав угленита вводится небольшое количество хлорида натрия. В качестве желатинизатора применяется натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы (NaKМЦ).

Предохранительные ВВ V класса применяются для шпуровых зарядов в сухих и мокрых забоях шахт, повышенно опасных по метану и опасных по пыли, а также при разработке пластов, опасных по внезапному выбросам угля и метана.

Предохранительные ВВ VI класса предназначены для взрывных работ в особо опасных условиях угольных шахт (опасных по газу всех категорий и по пыли).

Промышленные ВВ VII класса представлены ионитом, который состоит из смеси натриевой селитры, хлорида аммония и сенсибилизатора. При взрыве ионита образуется ультрадисперсный хлорид натрия. В качестве желатинизатора применяется коллодионный хлопок.

Ионит используется для дробления угля или породы, при разрушении деревянных стоек, для распыления воды, при ликвидации зависания горной массы в спускных угольных выработках.

Предохранительные ВВ V–VII классов из-за содержания нитроэфиров характеризуются повышенной чувствительностью к механическим воздействиям, обладают более высокой токсичностью по сравнению с аммонитами, поэтому требуют более осторожного обращения.

Специальный класс С образуют непредохранительные и предохранительные ВВ и изделия из них, предназначенные для специализированных взрывных работ, кроме забоев подземных выработок, в которых возможно образование взрывоопасной концентрации метана и угольной пыли.

К этому классу относятся:

- шашки, прессованные из тротила и гексогена или литые из тротила и сплава тротила и гексогена для промежуточных детонаторов;
- кумулятивные накладные заряды (литые и прессованные из тротила) для дробления крупногабаритных кусков породы;
- ВВ для обработки металлов и других материалов взрывом. К ним относятся порошкообразные – аммониты АТ, А-2 (для сварки и штамповки); гранулированные – дымный взрывной порох ДВП (для штамповки); шнуровые заряды – кумулятивные гибкие ШКЗ (для резки на воздухе стальных конструкций толщиной до 25 мм), эластичный шнур ЭШ-1П (для резки); пластичные – гексопласт ГП-87К (для сварки и штамповки);
- заряды для создания заградительных полос при локализации лесных пожаров – шланговые заряды из порошкообразного аммонита ПЖВ-20 диаметром 36–38 мм и длиной до 10 м.

Отдельно следует выделить ВВ (сплав тротила с гексогеном – ТГ или тротила с гексогеном и алюминиевой пудрой – ТГА; гексогеносодержащие составы А-IX-1, А-IX-2; ТЭН; порох и др.), которые применяют для прострелочно-взрывных работ при перфорации и торпедировании глубоких нефтяных скважин. Этими ВВ снаряжают такие изделия, как перфораторы (кумулятивные корпусные многократного и однократного действия, кумулятивные бескорпусные, крупнокалиберные пулевые); грунтоносы боковые стреляющие; пороховые генераторы и аккумуляторы давления; торпеды (скважинные, фугасные, кумулятивные); взрывные пакеры.

Для неуказанных в классификации областей применения таких, например, как мелиоративные и водохозяйственные работы и сейсмическая разведка, используют обычно различные ВВ из числа приведенных .

Составы типичных ВВ для промышленных взрывных работ приведены в гл. 1.

Дополнительные сведения о составах промышленных ВВ и их свойствах можно найти в работах [1–3].

Хранение, использование и учет ВВ должны обеспечиваться в соответствии с требованиями Единых правил безопасности при взрывных работах.

К работам с взрывчатыми материалами допускаются лица, имеющие единую книжку взрывника, право на соответствующий вид работ, изучившие руководство по применению конкретного ВВ и прошедшие соответствующий инструктаж.

Механизированные операции с промышленными ВВ на складах их хранения производятся только с применением механизмов, допущенных Госгортехнадзором РФ для данных взрывных материалов.

Ликвидация отказавших скважинных зарядов ПВВ обеспечивается в соответствии с требованиями Единых правил безопасности при взрывных работах и Временной инструкцией по предупреждению и ликвидации отказавших зарядов, согласованной с Гортехнадзором РФ. При этом заряжание скважин (шурфов) для ликвидации отказа производится тротилосодержащими ВВ. Для производства работ по ликвидации отказавших зарядов на предприятии разрабатываются специальные мероприятия по обеспечению безопасности работы.

Транспортируют ПВВ в крытых транспортных средствах согласно действующим правилам перевозки опасных грузов для соответствующего вида транспорта.

При транспортировании железнодорожным транспортом осуществляется повагонная перевозка, мелкими партиями; род подвижного состава – крытый вагон.

Транспортирование автомобильным транспортом осуществляется в соответствии с требованиями Единых правил безопасности при

взрывных работах, Правил **перевозки взрывчатых материалов автомобильным транспортом, согласованными с МВД и утвержденными** Госгортехнадзором РФ.

11.3. Токсичность продуктов взрыва [1, 5]

Кислородный баланс. Большинство ВВ представляют собой органические вещества, состоящие из элементов углерода, водорода, кислорода и азота. В результате взрыва образуются устойчивые продукты, в основном CO, CO_2, H_2O, N_2, O_2 и C в различных соотношениях и в очень небольших количествах CH_4, NH_3, C_2H_2, C_2N_2, HCN.

Наличие и соотношение перечисленных продуктов взрыва зависят от количества в ВВ кислорода и элементов (C и H), которые могут окисляться за счет него. С этой точки зрения ВВ делятся на три группы веществ с количеством кислорода:

- достаточным для окисления горючих элементов (например, нитроглицерин);
- недостаточным для полного окисления горючих элементов, но достаточным для полного превращения их в газы (например, гексоген, ТЭН);
- недостаточным для полного превращения горючих элементов в газы (например, тротил).

Состав продуктов взрыва ВВ в значительной мере определяется их кислородным балансом.

Кислородным балансом называют избыток или недостаток кислорода в веществе по сравнению с количеством, необходимым для полного окисления содержащихся в нем углерода, водорода и других веществ, способных к окислению при взрыве. По этому признаку различают ВВ с положительным, нулевым или отрицательным кислородным балансом.

Такое деление на группы условно, так как при взрыве ВВ, относящихся к первой группе, образуются в небольших количествах продукты неполного окисления (CO и H_2) и свободный кислород, а в продуктах взрыва ВВ второй группы содержится и некоторое количество свободного углерода. Имеются также ВВ, совсем не содержащие кислорода.

Уравнение реакции разложения ВВ с положительным или нулевым кислородным балансом. Возможны различные реакции взаимодействия между углеродом, кислородом, водородом и азотом, которые содержатся во взрывчатом веществе. При теоретическом расчете уравнений реакции разложения ВВ допускают, что при высокой температуре взрыва успевает установиться термодинамическое равновесие. Кроме того, опыт показывает, что для такой системы с положительным кис-

лородным балансом в первом приближении можно учесть известный принцип наибольшей работы [5].

Следовательно, при взрывном превращении ВВ с положительным или нулевым кислородным балансом можно в первом приближении принять простое правило: весь углерод окисляется в CO_2, и водород в H_2O, а азот и избыток кислорода выделяются в элементарном состоянии. Исходя из этого, например, реакцию взрывного превращения нитроглицерина можно представить в следующем виде:

$$C_3H_5(ONO_2)_3 = 3CO_2 + 2{,}5H_2O + 1{,}5N_2 + 0{,}25O_2.$$

Уравнение реакции разложения ВВ с отрицательным кислородным балансом – содержание кислорода достаточно для превращения всего углерода в газы. Для написания реакций взрывного превращения таких ВВ пользуются следующим приемом: считают, что кислород, входящий в состав молекул ВВ, сначала окисляет весь водород в воду и углерод в оксид углерода, а затем оставшаяся часть кислорода реагирует с образовавшимся оксидом углерода. В результате в продуктах разложения, кроме CO_2, H_2O и N_2, появляются CO и H_2. Пользуясь этим правилом, уравнение взрывчатого превращения ТЭНа можно записать в следующем виде:

$$C(CH_2ONO_2)_4 = 1{,}76CO + 3{,}24CO_2 + 0{,}24H_2 + 3{,}76H_2O + 2N_2.$$

Уравнение реакции разложения ВВ с отрицательным кислородным балансом – содержание кислорода недостаточно для окисления всего углерода в CO. Для таких ВВ уравнение реакции взрывного превращения записывают, исходя из расчета, по которому кислород сначала окисляет водород в воду, затем оставшаяся часть кислорода реагирует с углеродом, образуя оксид углерода, а неокисленная часть углерода выделяется свободной. Например, для тротила реакцию взрывчатого превращения можно представить в следущем виде:

$$C_6H_2(NO_2)_3CH_3 = 3{,}5CO + 2{,}5H_2O + 1{,}5N_2 + 3{,}5C.$$

Причины образования токсичных газов. При практическом применении в зависимости от типа ПВВ, условий их использования и других факторов в продуктах взрыва присутствуют и другие вещества, например, оксиды азота NO, NO_2, N_2O_3 и др.

Основной причиной их образования является отклонение кислородного баланса от нулевого. При отрицательном кислородном балансе ВВ в продуктах взрыва возникает больше оксида углерода CO, при положительном – оксида азота NO. Количество оксидов углерода по-

вышается также за счет горючих оболочек зарядов (бумаги, пропитанной парафином, мешковины, крепежной веревки и др.), которые, воспламеняясь и взаимодействуя с продуктами взрыва из-за недостатка кислорода, образуют оксид.

Вторая причина появления ядовитых газов вызвана неполнотой взрывчатых превращений и незавершенностью реакций. Эта причина особенно характерна для смесевых ПВВ. Процесс их взрыва протекает в две стадии: первичного распада компонентов (их газификации) и вторичных реакций взаимодействия продуктов распада между собой. Полнота вторичных реакций зависит от температуры и скорости смешивания продуктов первичного распада. Если происходит их быстрое охлаждение (например, в результате контакта с выбрасываемой породой, быстрого расширения при взрыве в воздухе) или задержка смешения (например, из-за крупных, медленно распадающихся частиц компонентов ВВ), то в продуктах взрыва сохраняются ядовитые газы от первичного распада – оксиды азота, углерода и др. При полном завершении вторичных реакций (например, при взрыве в массиве заряда с достаточной и хорошо выполненной забойкой, препятствующей преждевременному расширению и охлаждению продуктов взрыва) образуется некоторое, хотя и меньшее, количество ядовитого оксида углерода и оксидов азота в результате равновесных реакций диссоциации углекислого газа CO_2 и окисления азота.

Ядовитые газы могут возникать также в результате химического взаимодействия продуктов взрыва с окружающей природой, в результате чего углекислый газ CO_2 может быть восстановлен до ядовитого оксида углерода CO. При взрыве в массивах, содержащих серу, могут формироваться ядовитые оксиды серы и сероводород. Капсюли-детонаторы и электродетонаторы в зависимости от состава инициирующего ВВ при взрыве образуют пары ртути или свинца.

Оксид углерода (угарный газ) встречается везде, где существуют условия для неполного сгорания веществ, содержащих углерод.

ПДК CO в воздухе рабочей зоны – 20 мг/м^3. При длительности работы не более 1 ч допустимая концентрация CO может быть повышена до 50 мг/м^3, в течение 30 мин – до 100 мг/м^3, не более 15 мин – до 200 мг/м^3. Повторные работы при повышенных концентрациях разрешается проводить не ранее чем через 2 ч. При одновременном наличии в воздухе CO и оксидов азота рекомендуется снижение допустимых концентраций первого в 1,5 раза, а второго в 3 раза. Отмечено суммирование и даже некоторое усиление действия CO в присутствии H_2S, в связи с чем рекомендуется соответственно снижать ПДК каждого из газов, а также уменьшать допустимый срок кратковременного пребывания при повышенной концентрации CO. ПДК оксида углерода в атмосферном воздухе населенных мест: максимальная разовая 6 мг/м^3, среднесуточная – 1,0 мг/м^3.

Оксид азота является ядом для крови и оказывает, по-видимому, прямое действие на центральную нервную систему. ПДК оксида азота в помещениях рабочей зоны – 30 мг/м^3, максимальная разовая – 0,3 мг/м^3 и среднесуточная – 0,1 мг/м^3 в атмосфере воздуха населенных пунктов.

Диоксид серы раздражает дыхательные пути, вызывая спазм бронхов и увеличение сопротивления дыхательных путей. ПДК для SO_2 в помещениях рабочей зоны составляет 10 мг/м^3, для SO_3 – 1 мг/м^3.

Сероводород H_2S – сильный нервный яд, вызывающий смерть от остановки дыхания. ПДК сероводорода в помещениях рабочей зоны 10 мг/м^3, в смеси с углеводородами – 3 мг/м^3.

В продуктах взрыва, как правило, присутствует несколько ядовитых газов и паров. Поэтому оценивать токсическое действие принято путем пересчета на условный оксид углерода по формуле

$$X = X(CO) + 6{,}5X(NO_2) + 2{,}5X(SO_2) + 2{,}5X(H_2S),$$

где $X(CO)$, $X(NO_2)$, $X(SO_2)$ и $X(H_2S)$ – количество соответствующих газов в смеси; 6,5 и 2,5 – коэффициенты, учитывающие вредность соответствующих газов по сравнению с CO.

Количество ядовитых газов, образующихся при взрыве 1 кг ВВ, определенное расчетным путем, не всегда соответствует действительности вследствие существенного влияния различных факторов. Поэтому для большинства промышленных ВВ они установлены экспериментально (табл. 11.1)

Из экспериментальных данных (см. табл. 11.1) о токсичности продуктов взрыва аммонита 6ЖВ (кислородный баланс +0,3%) следует, что их токсичность в зависимости от условий взрыва изменяется в 5–6 раз.

Таблица 11.1

Состав ядовитых газов при взрыве зарядов аммонита 6ЖВ

Условия взрывания	Количество газов, л/кг		
	Оксид углерода	Оксиды азота	Суммарное в пересчете на CO
Заряд свободно подвешен в воздухе	33–35	20,5–22,8	167–189
Взрыв в шпуре:			
без забойки	34–35	2,8–3,3	50–52
с забойкой 20 см глиной	32–41,5	1,1–2,0	45–50
То же водой	11,7–18,5	1,8–3,2	30–32

При производстве массовых взрывов возникает пылегазовое облако, содержащее определенное количество ядовитых газов. Распространяясь на большие расстояния, такое облако наносит большой ущерб окружающей среде и человеку. Например, содержащийся в облаке диоксид азота NO_2 взаимодействует с атмосферной влагой, образуя азотистую и азотную кислоты, которые в виде капель выпадают на земную поверхность (кислотные дожди).

Расстояние, безопасное по действию ядовитых газов при массовых взрывах на земной поверхности, по данным треста «Союзвзрывпром», может определяться по формуле

$$r_{го} = 160\sqrt[3]{Q}(1 + 0,5v_в),$$

где $r_{го}$ – радиус опасной зоны, в пределах которой по направлению ветра содержание ядовитых газов (в пересчете на условный оксид углерода) превышает ПДК, м; Q – общая масса ВВ в зарядах, кг; $v_в$ – скорость ветра, м/с. Расстояние, безопасное по действию ядовитых газов при массовых подземных взрывах зарядов в подземных выработках рудников, по данным [1],

$$r_{гп} = n(V_0 - V_с)/S,$$

где $r_{гп}$ – протяженность опасной зоны по направлению поступления в очистной блок воздушной струи (без учета влияния вентиляции), м; n – коэффициент, учитывающий долю объема загазированных выработок одного направления от общего объема таких выработок; V_0 – общий объем загазированных выработок со стороны поступающей воздушной струи, м^3; $V_с$ – свободный объем выработок горизонта блока, в котором выполнен взрыв, м^3; S – средневзвешенная площадь сечения выработок, по которым движутся газы, м^2.

Количество и состав ядовитых газов зависят от химического состава ВВ, полноты детонации зарядов и от химических, физико-механических и теплофизических свойств взрываемых пород. В результате взаимодействия продуктов взрыва зарядов ВВ с породой может произойти дополнительное выделение ядовитых газов или, наоборот, снижение их количества. Чем выше коэффициент крепости пород, тем больше образуется оксида углерода и, как правило, меньше оксидов азота.

Б.Д. Росси предложил разделить горные породы по «газовой вредности» на три группы в зависимости от количества ядовитых газов, которые выделяются при взрыве в данных породах ВВ с кислородным балансом, близким к нулевому.

К первой группе отнесены апатиты, нефелины, калийные соли, молибденовые, некоторые медные и полиметаллические руды (количество ядовитых газов составляет 10–40 л на 1 кг ВВ).

Ко второй группе принадлежат угли и вмещающие их породы, свинцово-цинковые, мартитовые железные и золотоносные руды (40–100 л на 1 кг ВВ).

В третью группу включены джеспилитовые железные руды (более 100 л на 1 кг ВВ).

Состав токсичных продуктов взрыва, как уже отмечалось, в сильной степени зависит от кислородного баланса ВВ. При положительном кислородном балансе преимущественно выделяется оксид азота, а при отрицательном – оксид углерода. ПДК оксида азота в 6,5 раз превосходит ПДК оксида углерода.

В результате исследований, проведенных в разных странах, установлено, что для каждого ВВ существует свой химический (петрографический) состав породы, при взрывании в которой образуется наименьшее количество ядовитых газов.

Существуют ограничения по количеству выделяемых при взрыве ядовитых газов. Например, в США для предохранительных ВВ установлен предел токсичных продуктов взрыва 156 л/кг. Для ВВ, применяемых для взрыва на открытых горных выработках, этот показатель не нормируется.

Способы снижения токсичности продуктов взрыва. Одной из причин образования ядовитых газов при взрыве ВВ с кислородным балансом, близким к нулевому, является неполнота реакции взрывного превращения. С повышением детонационной способности ВВ уменьшается количество ядовитых газов.

Взаимодействие продуктов разложения отдельных компонентов облегчается при наличии в составе ВВ каталитически активных добавок. Доказано, что введение в состав аммонитов некоторого количества калиевой селитры приводит к уменьшению образования при взрыве не только оксидов азота, но и оксида углерода [1].

Существенное влияние на образование ядовитых газов оказывают соли-пламегасители, применяемые в предохранительных ВВ – хлористый натрий и хлористый калий. Они способствуют более полному завершению реакции и, следовательно, уменьшению количества ядовитых газов. Особенно заметно снижается при этом содержание оксидов азота.

Повышение плотности заряда ВВ вначале приводит к уменьшению количества ядовитых газов в продуктах взрыва. Затем после достижения определенной (критической) плотности заряда дальнейшее увеличение плотности вызывает рост количества выделяющихся ядовитых газов при взрыве. Поскольку увеличение плотности ВВ сверх критической обусловливает снижение полноты его детонации.

Влага в составе ВВ является компонентом, затрудняющим его детонацию. Поэтому повышение влажности ВВ приводит к росту количе-

Таблица 11.2

Зависимость изменения количества ядовитых газов от массы оболочки

Масса оболочки, г, на 1 кг ВВ (бумага/парафин)	Количество ядовитых газов, л/кг		
	Оксид углерода	Оксиды азота	Условный оксид углерода
0/0	7,5	4,2	35,0
1,2/1,7	28,3	4,7	58,9
2,0/2,5	29,6	5,1	62,8

ства ядовитых газов, в основном оксидов азота. С другой стороны, чем большее количество воды будет взаимодействовать с продуктами взрыва ВВ, тем больше количества оксида углерода окислится до CO_2.

Влияние массы бумажно-парафиновой оболочки заряда ВВ на количество ядовитых окислов при взрыве прессованного аммонита 6ЖВ можно выяснить из данных табл. 11.2 [1].

Чтобы ограничить отрицательное влияние бумажно-парафиновой оболочки на образование ядовитых газов, государственным стандартом на ПВВ установлена максимальная масса бумажной оболочки и гидроизоляционного покрытия (парафин–петролатум) на патронах до 2 г на 100 г ВВ.

Большое значение для уменьшения образования ядовитых газов имеет правильное ведение взрывных работ. Так как полностью исключить образование газов не удается, то применяют различные методы их нейтрализации. Они включают орошение забоев перед взрывом водой или щелочными растворами для поглощения оксидов азота. Этим же целям служат улучшение качества ВВ, использование качественной породной забойки и гидрозабойки, воздушно-механической пены и др.

Действенным средством борьбы с отравлениями ядовитыми продуктами взрыва является хорошая вентиляция подземных выработок. Чтобы проветривание могло обеспечить в короткий срок снижение концентрации газов до санитарно-гигиенических норм, предельное содержание ядовитых газов при взрыве промышленных ВВ не должно превышать 80 л на 1 кг заряда.

Дополнительные сведения о технической и экологической безопасности применения ПВВ на взрывных работах можно найти в работах [1, 2].

Литература

1. Промышленные взрывчатые вещества на основе утилизируемых боеприпасов/Под общ. ред. Ю.Г. Щукина: Учеб. пособие для вузов. – М.: Недра, 1998. – 319 с.

2. *Забелин Л.В., Гафиятуллин Р.В., Кузьмицкий Г.Э.* Защита окружающей среды в производстве порохов и твердых ракетных топлив. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 174 с.

3. *Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И.* Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1973. – 320 с.

4. Безопасность при взрывных работах: Сб. док. Сер. 13. Вып. 1/Колл. авт. – М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора в промышленности России», 2001. – 244 с.

5. *Горст А.Г.* Пороха и взрывчатые вещества. – М.: Машиностроение, 1972. – 208 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
Глава 1. **Общие сведения о промышленных взрывчатых веществах** 6
1.1. Краткий исторический обзор создания промышленных взрывчатых веществ 6
1.2. Классификация промышленных взрывчатых веществ по составу компонентов 11
Литература 24
Глава 2. **Структура и свойства промышленных взрывчатых веществ** 26
2.1. Классификация дисперсных смесей 26
2.2. Структура и структурные связи сыпучих промышленных взрывчатых веществ 27
2.3. Структура эмульсионных промышленных взрывчатых веществ 47
2.4. Структура гелеобразных промышленных взрывчатых веществ 51
2.5. Структура полимерных композиционных промышленных взрывчатых веществ 52
2.6. Основные физико-механические свойства 54
Литература 69
Глава 3. **Основы технологии промышленных взрывчатых веществ** 71
3.1. Технология сыпучих аммиачно-селитренных промышленных взрывчатых веществ 71
3.2. Технология пластичных промышленных взрывчатых веществ 82
3.3. Водосодержащие промышленные взрывчатые вещества 86
3.4. Технология промышленных взрывчатых веществ на карьерах и рудниках 90
Литература 98

Глава 4. **Общие закономерности процессов переноса** 99
4.1. Непрерывный континуум и понятие о сплошной среде 99
4.2. Напряженно-деформированное состояние в точке 100
4.3. Основные дифференциальные уравнения механики сплошных сред 106
Литература 108
Глава 5. **Механические процессы в производстве промышленных взрывчатых веществ** 109
5.1. Измельчение твердых тел 109
5.2. Классификация сыпучих материалов 142
5.3. Смешивание сыпучих материалов 153
5.4. Специальное оборудование 177
Литература 183
Глава 6. **Гидромеханические процессы в производстве промышленных взрывчатых веществ** 185
6.1. Основные уравнения гидродинамики вязких жидкостей 185
6.2. Перемешивание жидких сред 188
6.3. Диспергирование жидких сред 201
Литература 227
Глава 7. **Тепловые и массообменные процессы в производстве промышленных взрывчатых веществ** 229
7.1. Кристаллизация расплавов 229
7.2. Сушка твердых дисперсных материалов 246
Литература 267
Глава 8. **Процессы компактирования твердых дисперсных сред давлением в производстве промышленных взрывчатых веществ** 269
8.1. Прессование промышленных взрывчатых веществ ... 269
8.2. Формирование патронов промышленных взрывчатых веществ шнекованием 292
8.3. Патронирование взрывчатых веществ виброуплотнением 302
8.4. Формование зарядов из пластичных промышленных взрывчатых веществ экструзией 308
8.5. Формование зарядов детонирующих шнуров 318
Литература 327
Глава 9. **Промышленные взрывчатые вещества на основе утилизированных боеприпасов** 329
9.1. Особенности технологии расснаряжения боеприпасов 329
9.2. Расснаряжение боеприпасов методом выплавки 331
9.3. Расснаряжение боеприпасов методом гидравлического вымывания 335

9.4. Расснаряжение боеприпасов гидровымыванием с гидрорезкой корпусов 340
9.5. Промышленные взрывчатые вещества на основе взрывчатых веществ и порохов утилизируемых боеприпасов 344
Литература 352
Глава 10. **Взрывозащищенность технологического оборудования при изготовлении промышленных взрывчатых веществ** 353
10.1. Общие положения 353
10.2. Причины аварий в производстве взрывчатых материалов 360
10.3. Основные требования взрывобезопасности конструкций аппаратов 363
10.4. Защита технологического оборудования от статического электричества 373
10.5. Противопожарная защита технологического оборудования 377
Литература 379
Глава 11. **Экология изготовления и использования промышленных взрывчатых веществ** 380
11.1. Токсичность промышленных взрывчатых веществ и их компонентов 380
11.2. Условия безопасного применения промышленных взрывчатых веществ 383
11.3. Токсичность продуктов взрыва 387
Литература 393

Учебное издание

Генералов Михаил Борисович

ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Редактор *Н.В. Пинчук*

Художник *А.С. Скороход*

Дизайнер *С.В. Машин*

Компьютерный дизайн и верстка *С.Н. Лаврентьева*

ИД № 04284 от 15.03.2001.

Подписано в печать 04.11.2003. Формат 60x901/16. Гарнитура NewtonC. Печать офсетная. Печ. л. 25. Тираж 3000 экз. Тип. зак. 4590.

Международная академическая
издательская компания «Наука/Интерпериодика»

Издательско-книготорговый центр «Академкнига»
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

По вопросам поставок обращаться
в отдел реализации ИКЦ «Академкнига»
Тел./факс: (095) 334-73-18
e-mail: bookreal@maik.ru, web-site: http: // www.maik.ru

Отпечатано в ОАО «Ивановской областной типографии»
153008, г. Иваново, ул. Типографская, д. 6
E. mail: 091018@adminet.ivanovo.ru

ISBN 5-94628-130-5